REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE Dr YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DU GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE



Mémoire de Magister en
Electronique

Option : Instrumentation et Microélectronique

Présenté par : **MAHMOUDI Brahim**

Thème

DEVELOPPEMENT ET EVALUATION DE FONCTIONNALITES D'AUTO-ORGANISATION POUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

Devant le jury :

M^r^. ABUDURA Salam	**Professeur, U.MEDEA**	**Président**
M^r^. BATEL Noureddine	**MCA, U.MEDEA**	**Examinateur**
M^r^. GUESSOUM Abderrezak	**Professeur, U.BLIDA**	**Examinateur**
M^r^. OULD ZMIRLI Mohamed	**MCA, U.MEDEA**	**Directeur de mémoire**

Mai 2014

Remerciements

***E**n premier lieu, je remercie le Bon Dieu de m'avoir donné la force et le courage pour accomplir ce travail et qui m'a procuré ce succès.*

***J**e tiens à remercier en premier lieu Mr. **Mohamed OULDZMIRLI** pour son encadrement et pour l'encouragement et l'intérêt qu'il m'a apporté pour l'accomplissement de ce travail et surtout pour son grande aide et ses qualités humaines.*

***J**'adresse aussi mes très sincères remerciements à Mr. **Salam ABUDURA** de me faire l'honneur de s'intéresser à ce travail et d'avoir présidé le jury.*

***J**'exprime ensuite ma plus profonde gratitude à Mr. **Noureddine BATEL** et Mr. **Abderrezak GUESSOUM** qui ont accepté d'examiner ce travail malgré leur emploi du temps surchargé.*

***J**e remercie le directeur de INSFP DE MEDEA qui ma autoriser de continuer mes études en poste graduation.*

***U**n grand merci à mes enseignants, mes amis, ainsi que mes collègues, un chaleureux merci pour Mr. **Mohamed GUEDMANI**, pour ses encouragements et pour toute son aide.*

Dédicaces

Je dédie ce mémoire A:

- Mes très chers parents pour les sacrifices et les encouragements qu'ils n'ont cessé de me conférer .que dieu les garder éternellement heureux.
- Ma très chère femme qui ma beaucoup encourager pour continuer mes études et mes chers enfants HOUSSEM EDINNE, AYMANE ZINEDINNE et DIA EDINNE que dieu les protèges et les gardes en bonne santé.
- Mes frères et sœurs ainsi que leurs enfants sans exception.
- Toute la famille MAHMOUDI et YAICHE chacun son nom
- Toute la famille MOUALDIA
- Mes collègues de l'I.N.S.F.P Médéa.
- Nos enseignants de poste graduation.
- A la mémoire de père de ma femme el hadj AHMED.
- A la mémoire de ma très chère grande mère.

ملخص

في السنوات الأخيرة كان هناك تطور سريع جدا لشبكات الاتصالات اللاسلكية. وقد أدى هذا التطور إلى اهتمام أكثر وأكثر بالشبكات اللاسلكية دون أي بنية تحتية خاصة.و بموازاة ذلك، التقدم في التصغير من المكونات الإلكترونية قد أدي إلى تحسين نوع معين من المعدات المخصصة للمراقبة عن بعد. وبالتالي فإن سوق الشبكات والتطبيقات اللاسلكية نمت بشكل كبير والبحوث في مجال أجهزة الاستشعار تشهد ثورة كبرى، تفتح آفاقا واسعة للتأثير في العديد من المجالات التطبيقية (العسكرية، الصحة والبيئة وسلامة الأغذية، والتصنيع، والاتصالات، والروبوتات، ...).

تتكون شبكة الاستشعار اللاسلكية عادة من عدد كبير من الأجهزة اللاسلكية قادرة على أداء التدابير البيئية . ومن الأمثلة النموذجية درجة الحرارة، الضوء، الضوضاء، والرطوبة، الخ. وتنتقل هذه القياسات الاستشعارية من خلال البث الإذاعي إلى عقدة مركزية تسمى **محطة قاعدة** حيث تعتبر همزة وصال مع الوسط الخارجي لشبكة الاستشعار اللاسلكية. الطاقة عنصرا أساسيا في تصميم شبكة من الفروع وأجهزة الاستشعار اللاسلكية التي عادة ما تعمل بواسطة البطاريات. الهدف من هذا العمل هو اقتراح ودراسة منهجية هرمية التنظيم الذاتي منخفض الطاقة التكيفية للمجموعات التسلسل الهرمي معدلة(LEACH-m) حيث نعتمد على ما يلي :

- استخدام المحطة الأساسية باعتبارها عقدة تجميع للبيانات، باعتبار أن لديها القدرة الحاسوبية العالي وطاقة لا حدود لها.
- استخدام فكرة البروتوكول SEP-Z للاتصال المباشر من العقد التي هي قريبة من المحطة الأساسية مقارنة العنقودية رؤساء الكتل التي شكلتها الجولة (جولة). وفي غياب زعماء المجموعة، فإن عقدة استشعار يمكن لها التواصل مباشرة مع المحطة الأساسية.

Résumé

Depuis ces dernières années, on constate un développement très rapide des réseaux de communication sans fil. Ce développement a conduit à un intérêt de plus en plus important vers les réseaux sans fil sans infrastructure spécifique. En parallèle, le progrès de la miniaturisation des composants électroniques a fait émerger un type particulier d'équipements dédié à la surveillance à distance. C'est ainsi que le marché des réseaux et des applications sans fil s'est considérablement développé et la recherche dans le domaine des capteurs subit actuellement une révolution importante, ouvrant des perspectives d'impacts significatifs dans de nombreux domaines d'application (militaire, santé, environnement, sécurité alimentaire, fabrication, télécommunication, robotique,. . .).

Un réseau de capteurs sans fil se compose généralement d'un nombre important de dispositifs sans fil capable de réaliser des mesures environnementales. Les exemples typiques incluent la température, la lumière, le bruit, l'humidité, etc. Ces mesures de capteurs sont transmises à travers une transmission radio vers un nœud central appelé Station de Base qui constitue la passerelle vers une application utilisateur dédiée qui prend des décisions basées sur ces lectures de capteurs. Souvent, les capteurs nécessitent un déploiement dans des environnements hostiles, où les nœuds ainsi que les liens de communication sont continuellement exposés à des contraintes importantes. Cet objectif se complique davantage à cause de l'absence d'infrastructure de communication fixe, en plus de limitations matérielles imposées par la taille miniaturisée des capteurs. L'énergie est une donnée essentielle dans le design d'un réseau de capteurs sans fil du fait que les nœuds sont généralement alimentés par des batteries. L'objectif de ce travail est de proposer puis d'étudier une méthodologie de protocole d'auto-organisation hiérarchique (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Modified LEACH-m), basée sur :

- L'utilisation de la station de base comme un nœud d'agrégation des données, puis -qu'elle est dotée d'une puissance de calcul supérieur et d'une énergie infinie.
- L'idée du protocole Z-SEP concernant la communication directe des nœuds qui sont proche de la station de base par rapport aux cluster-heads des clusters formés par round (tour).

Et dans le cas d'absence de chefs de groupes, le nœud capteur communiquera directement avec la station de base.

Mots clés : réseaux de capteurs sana fil, WSN, auto-organisation, protocole d'auto-organisation, Clustering, consommation d'énergie.

Abstract

In recent years there has been a very rapid development of wireless communication networks. This development has led to an interest of more and more important to wireless networks without any special infrastructure. In parallel, advances in miniaturization of electronic components has given rise to a particular type of equipment dedicated to remote monitoring. Thus the market networks and wireless applications has grown considerably and research in the field of sensors is undergoing a major revolution, opening up significant opportunities for impact in many application areas (military, health, environment, food safety, manufacturing, telecommunications, robotics, ...).

A wireless sensor network typically consists of a large number of wireless devices capable of performing environmental measures. Typical examples include temperature, light, noise, humidity, etc. . These sensor measurements are transmitted through a radio transmission to a central node called Base Station which is the gateway to a dedicated user application that makes decisions based on these sensor readings . Often, sensors require deployment in hostile environments, or nodes and the communication links are continuously exposed to high stresses. This objective is further complicated because of the lack of fixed communication infrastructure in addition to physical limitations imposed by the size of miniaturized sensors. Energy is an essential element in the design of a network of wireless sensor nodes that are usually powered by batteries. The objective of this work is to propose and study methodology hierarchical self-organization (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Modified LEACH-m) based on protocol:

- The use of the base station as a node aggregation of the data, then it has a higher computing power and boundless energy.
- The idea of Z-SEP protocol for direct communication of nodes that are close to the base station compared to cluster-heads of clusters formed by round (round). And in the absence of group leaders, the sensor node will communicate directly with the base station.

Table Des Figures

Chapitre I

Figure I-1	Réseau de capteurs sans fil.....	4
Figure I-2	Architecture générale d'un réseau de capteurs sans fils.....	5
Figure I-3	Topologie Hiérarchique.....	6
Figure I-4	Topologie plate (Flat)	7
Figure I-5	Topologie Basée Localisation.....	8
Figure I-6	Schéma synoptique d'un nœud capteur.....	10
Figure I-7-	Consommation d'énergie dans un nœud capteur	11
Figure I-8-a	Capteur MicaZ.....	12
Figure I-8-b	Carte MTS400.....	12
Figure I-9	Station de base.....	13
Figure I-10	composition matérielle du MSP430F2274.....	13
Figure I-11-	Les différentes normes sans fil	14
Figure I-12	Pile protocolaire des RCSF.....	17
Figure I-13	Contrôle de l'environnement.....	21
Figure I-14	Un service militaire utilisant les RCSF.....	22
Figure I-15	Application des RCSF dans le domaine de la médecine.....	23
Figure I-16	Quelques domaines d'application pour les RCSF.....	24

Chapitre II

Figure II-1	Exemple d'une structure des clusters.....	32
Figure II-2	Etapes de construction d'une topologie en clusters.....	33
Figure II-3	Classification des algorithmes de clusterisation.....	34

Figure II-4 *Exemple de structures de l'ensemble des cluster-heads*..... *37*

Figure II-5 *Le Protocole d'auto-organisation LEACH*..... *44*

Figure II-6 *Le déroulement du protocole LEACH en cycles* *44*

Figure II-7 *Probabilité Optimale* *45*

Figure II-8 *Répartition du temps et différentes phases dans le cycle de LEACH* *47*

Figure II-9 *Méthodes d'accès au médium (TDMA,CDMA)* *47*

Figure II-10 *Opérations de l'étape d'initialisation (Set up) de LEACH* *48*

Figure II-11 *Opérations de la phase de communication (Steady-state) de LEACH* *49*
.

Figure II-12 *Répartition de nœuds du réseau avec Z-SEP*..... *51*

Chapitre III

Figure III-1 *L'organigramme De Protocole LEACH*..... *55*

Figure III-2 *Modèle de consommation d'énergie pour la communication* *58*

Figure III-3 *Réseau Homogène aléatoirement déployé*..... *60*

Figure III-4 *Réseau Hétérogène avec m=0.2 (n=100 nombre total de nœuds)*..... *60*

Figure III-5 *La Période de stabilité en fonction de degré d'hétérogénéité (m*a)*..... *61*

Figure III-6 *Le nombre de nœuds morts en fonction de round*..... *62*

Figure III-7 *Nombre de messages reçus par la station de base en fonction de rounds*... *62*

Figure III-8 *Nombre de nœuds morts par types de nœuds en fonction de rounds du LEACH* *64*

Figure III-9 *L'organigramme De Protocole SEP*..... *67*

Figure III-10 *Région de Stabilité (Période) en fonction de Degré d'Hétérogénéité*..... *68*

FigureIII-11 *Le nombre de nœuds vivants en fonction de tours*..... *71*

FigureIII-12 *Nombre de messages reçus par la station de base en fonction de tours* *72*

Figure III-13 *Nombre de nœuds vivants en fonction de Tours avec : m=0.2 et a=1*..... *73*

Figure III-14 *L'organigramme De Protocole LEACH modifié*..... *76*

Figure III-15 *Période de stabilité d'un réseau homogène*..... *78*

Figure III-16 *Période de stabilité d'un réseau hétérogène*..... *79*

Figure III-17 *Durée de vie du réseau en fonction de Tours* *80*

FigureIII-18 *Durée de vie du réseau en fonction de pourcentage des nœuds morts*..... *82*

FigureIII-19 *Nombre de messages reçus par la station de base* *84*

Figure III-20 *Nombre de messages reçus par la station de base en fonction de nombre de nœuds*..... *85*

Liste Des Tableaux

Tableau I-1 *Tableau comparatif chiffré entre différents protocoles de communication sans fil* 15

Tableau III-1 *Paramètre de Simulations* 59

Tableau III-2 *Durée de vie du réseau et nombre de messages reçus par SB*..... 63

Tableau III -3 *Tableau comparatif en terme période de stabilité*..... 68

Tableau III -4 *période de stabilité du protocole SEP en fonction de m*a* 69

Tableau III-5 *Comparaison entre LEACH et SEP*..... 70

Tableau III-6 *Tableau comparatif des résultats de simulations* 72

Tableau III-7 *Période de stabilité du réseau en fonction de densité du réseau*..... 77

Tableau III-8 *Tableau comparatif entre LEACH et LEACH-m (durée de vie)*..... 81

Tableau III-7 *Durée de vie du réseau* 81

Table des matières

Introduction Générale 1

Chapitre I: Généralité Sur Les Réseaux De Capteurs Sans fil

I-1 Introduction 3
I-2 Définition du réseau de capteurs 3
I-3 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil 4
I-4 Topologies des réseaux de capteurs sans ils 5
4-1 Topologie Hiérarchique 6
4-2 Topologie plate (Flat) 7
4-3 Topologie basée sur la Localisation 7
I-5 Caractéristiques des RCSFs 8
5-1 Densité importante des nœuds 8
5-2 Topologie dynamique 8
5-3 Auto organisation 9
5-4 Scalabilité (passage à l'échèle) 9
I-6 Composition d'un capteur sans fil 9
6-1 Schéma synoptique 9
a- L'unité d'acquisition 10
b- L'unité de traitement 10
c- Un module de communication (Transceiver) 10
d- Batterie 10
6-2 Description technique 11
- *Capteur MicaZ* 11
- *Capteurs MSP430F2274* 13

I-7 Les standards de communication pour les RCSFs 14
7-1 Bluetooth 15
7-1 ZigBee 15
I-8 Le système d'exploitation pour RCSF : TinyOS 16
I-9 Pile protocolaire 17
9-1 Couche physique 17
9-2 Couche liaison de données 18
9-3 Couche réseau 18
9-4 La couche transport 18
9-5 La couche application 19
9-6 Gestion d'énergie 19
9-7 Gestion de mobilité 19
9-8 La gestion des tâches 19

I-10 **Connectivité du RCSF** 20
I-11 **La localisation dans les RCSFs** 20
I-12 **Les applications des RCSF** 21
12-1 Contrôle de l'environnement 21
12-2 Militaire 21
12-3 Santé 22
12-4 Applications industrielles 23
12-5 La sécurité des infrastructures 23
I-13 **Classes d'applications des RCSF** 24
13-1 Applications orientées temps 24
13-2 Applications orientées événements 24
13-3 Applications orientées requêtes 25
13-4 Applications hybrides 25
I-14 **Problématiques** 25
I-15 **Conclusion** 26

Chapitre II: Techniques D'auto-organisation Des RCSFs

II-1 **Introduction** 27
II-2 **Définition et objectifs de l'auto-organisation**..... 27
2-1 Définition 27
2-2 Principes et objectifs 28
II-3 **Quelques clefs pour l'auto-organisation** 29
3-1 Emergence d'un comportement global à partir de règles locales... 29
3-2 Interactions locales et coordination des nœuds 29
3-3 Minimiser les informations sur l'état du réseau 30
3-4 Adaptation dynamique à l'environnement 30
II-4 **Techniques de clusterisation** 31
II-5 **L'avantage d'organiser en groupes un réseau** 31
✓ ***Exemple d'une structure des clusters***..... 31
II-6 **Construction d'une topologie en clusters** 32
II-7 **Classification des algorithmes de clusterisation** 33
7-1 Rayon des clusters 34
7-2 Métrique de sélection des cluster-heads 34
a- Sans métrique 35
b- Métrique arbitraire 35
c- Métriques liées à la topologie..... 35
d- Métriques spécifiques au nœud mobile..... 35
7-3 Structure de l'ensemble des cluster-heads 35
Définition II-1 : Ensemble dominant (DS) 36
Définition II-2 : Ensemble dominant connecté (CDS) 36
Définition II-3 : Ensemble dominant faiblement connecté (WDS) 36

Définition II-4 : Ensemble indépendant (IS) 36
II-8 Autres critères de classification..... 37
8-1 Nombre de degré hiérarchique..... 37
8-2 Type de maintenance 37
8-3 Recouvrement des clusters 38
II-9 Quelques approches de clusterisation..... 38
9-1 Les algorithmes de clusterisation à 1 saut..... 38
a- Les algorithmes à métrique arbitraire 38
b- Les algorithmes à métrique liée à la topologie 40
c- Les algorithmes à métrique spécifique au noeud mobile..... 41
d- Les algorithmes à métriques combinées 41
e- Les algorithmes sans métrique 42
II-10- Les algorithmes de clusterisation à k saut 42
II-11 Protocole d'auto-organisation LEACH 43
11-1 Principe général de fonctionnement du protocole LEACH..... 44
11-2 La Phase de construction (Set up phase) 45
a- Election des Cluster-heads 45
b- Annoncées des Cluster-heads 46
c- Formation des clusters 46
11- 3 Phase de communication 48
II-12 Le Protocole SEP (Stable Election Protocol) 49
II-13 Le Protocole Z-SEP (**Zonal-Stable Election Protocole**) 50
II-14 Conclusion..... 52

Chapitre III: Evaluation Des Protocoles D'auto-organisation

III-1 Introduction 53
III-2 L'algorithme d'auto-organisation LEACH 53
III-3 L'organigramme De Protocole LEACH 54
III-4 Simulation De Protocole LEACH 55
4-1 La simulation 55
4-2 La modélisation du système 56
4-3 Le modèle énergétique 57
4-4 Métriques utilisées 58
✓ ***La durée de vie de réseau***..... 58
✓ ***Période de stabilité*** 59
✓ ***La quantité d'information*** 59
III-5 Résultats des simulations..... 59
5-1 La Période de stabilité 59
5-2 La durée de vie de réseau & quantité d'information..... 61
III-6 Le Protocole SEP (Stable Election Protocol) 64
6-1 L'organigramme De Protocole **SEP** 66

III-7 **Résultats des Simulations de Protocole SEP** 68
7-1 La Période de stabilité 68
7-2 Durée de vie 69
7-3 Quantité d'information 71
III-8 **Résultats de simulation de protocole Z-SEP** 72
8-1 La durée de vie de réseau & quantité d'information..... 72
8-2 Quantité d'information 74
III-9 **L'amélioration de Protocole LEACH** 74
9-1 L'organigramme de Protocole LEACH modifié 75
9-2 Résultats des Simulations de Protocole LEACH modifié 77
✓ ***Période de stabilité*** 77
✓ ***Durée de vie du réseau*** 79
✓ ***Quantité d'information*** 83
III-10 **Conclusion**..... 86

Conclusion générale et perspectives 87

Annexe

Bibliographie

Introduction Générale :

Les récentes avances technologiques dans le domaine des communications sans fil ont permis le développement à faible coût de minuscules systèmes micro-électro-mécanique (MEMS), appelés capteurs, capables de détecter, mesurer et rapporter des données physiques liées à leur environnement. Ces capteurs sont caractérisés par de faible consommation énergétique, et ils ont trois fonctions principales : la capture de données reliées à leur environnement physique (température, pression, vibration, lumière, mouvement, etc.), le traitement des données collectées, et la transmission de ces données à un centre de traitement. Selon leur structure électronique, ils peuvent détecter des signaux mécaniques, acoustiques, électromagnétiques, vibratoires, etc. Les réseaux de captures sans fil RCSF ou WSN (Wireless Sensors Network) sont des réseaux sans infrastructure, généralement destinés à être déployés en grand nombre, pour couvrir des surfaces plus on moins larges.

La position des nœuds capteurs utilisés n'est pas obligatoirement conçue au préalable, ce qui permet leur déploiement aléatoire dans les terrains inaccessibles ou pendant les opérations de secours aux cas de désastres. Les protocoles employés doivent alors posséder des capacités de localisation et d'auto-organisation.

Toutes les caractéristiques décrites ci-dessus, ont permis un large étendu d'applications pour les réseaux de capteurs. Parmi les domaines d'application on cite : la santé (ex. suivi et assistance des patients à distance), le militaire (ex. supervision d'un champ de bataille), l'environnement et l'agriculture (ex. surveillance des feux de forêts et les changements climatiques), l'industrie, etc.

De nos jours, l'amélioration des performances des RCSF en termes de longévité et d'optimisation de ressources reste un défi à relever. Dans ce cadre, plusieurs axes de recherche allant de la phase de déploiement à celle de l'exploitation des réseaux ont été abordés. Parmi ces différents axes, on peut citer le développement des protocoles d'auto-organisation.

Contributions :

L'objectif de ce travail de recherche est de développer puis évaluer une proposition d'amélioration du protocole d'auto-organisation hiérarchique LEACH. Le protocole hiérarchique basé sur le clustering est considéré comme un outil permettant plus de performance en ce qui concerne la consommation de l'énergie par rapport aux autres types de protocole.

Nos contributions prennent en considération la communication directe entre :

- ✓ Les nœuds qui sont proche à la station de base par rapport aux chefs de groupes (clusters) formé par tour,
- ✓ Les nœuds isolés (absence de chefs de groupes),

et la station de base. Ainsi, nous avons supposé que la station de base est comme un nœud d'agrégation des données.

Ce document s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre de ce manuscrit présente les contraintes et les caractéristiques liées aux réseaux de capteurs, leurs topologies, leurs standards de communication et leurs domaines d'applications, nous décrivons, aussi dans ce chapitre l'architecture détaillée d'un capteur.

Le deuxième chapitre est une étude sur l'auto-organisation des réseaux de capteurs sans fil. Dans cette étude, nous avons présenté les différentes classifications des algorithmes de clusterisation, quelques approches de clusterisation et les protocoles d'auto-organisation basé sur la technique de clusterisation (LEACH, SEP et Z-SEP).

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats que nous avons obtenus. Pour tester, valider et évaluer les performances de notre contribution, en termes de période de stabilité, durée de vie du réseau et quantité de données envoyées à la station de base (une étude comparative avec le protocole LEACH).

Enfin, nous terminons le mémoire par une conclusion générale dans laquelle nous résumons l'essentiel de notre travail et nous donnons quelques orientations des travaux futurs.

Chapitre I

Généralité Sur Les Réseaux De Capteurs Sans Fil

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

I-1- Introduction :

Grâce aux avancées technologiques de plusieurs secteurs des technologies de l'information, il devient aujourd'hui envisageable de produire en masse des systèmes d'une taille extrêmement réduite (de quelques centimètres) et embarquant des unités de calcul et de communication sans fil pour un coût réduit. Ayant ces caractéristiques, les nœuds capteurs sont capables de générer et d'échanger des données d'une manière autonome et complètement transparente pour les utilisateurs.

Les réseaux de capteurs représentent actuellement un nouveau domaine, en plein développement, émergeant des innovations des technologies de communication.

L'objectif de ce chapitre est de faire une description synthétique des réseaux de capteurs, leurs architectures, leurs caractéristiques et contraintes ainsi que leurs domaines d'applications variés.

I-2- Définition du réseau de capteurs *:*

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) [LEH 09], [HEU 09] est un système distribué de grande échelle mettant en communication un grand nombre d'entités autonomes communément appelées « capteurs sans fil », ou simplement « capteurs ». Ces capteurs forment donc les nœuds du réseau.

Dans un scénario d'application classique, plusieurs nœuds capteurs sont déployés dans un certain environnement pour mesurer certains phénomènes physiques et faire remonter les informations collectées à une station de base, nommée le nœud puit (une porte d'entrée vers le monde extérieur qui fait l'interface entre le réseau de capteurs et l'utilisateur des données). Dans le cas le plus simple, les capteurs seront dans le voisinage direct du puit (un réseau de type étoile à un saut). Cependant, dans le cas d'un réseau à grande échelle, les capteurs ne sont pas tous dans le voisinage du puit et les messages seront acheminés du nœud source vers le puit en transitant par plusieurs nœuds, selon un mode de communication multi-sauts comme l'illustre la Figure I-1.

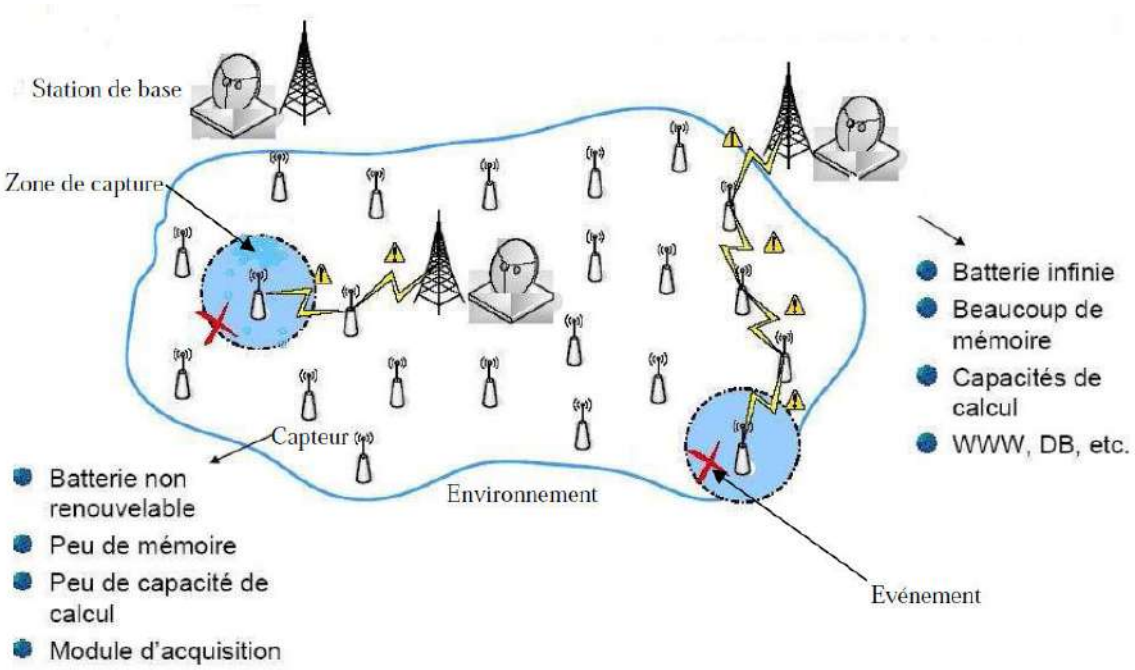


Figure I-1- Réseau de capteurs sans fil [CHA 08]

I-3- Architecture d'un réseau de capteurs sans fil:

Un réseau de capteurs est constitué essentiellement de plusieurs nœuds capteurs, un nœud Sink (station de base) et un centre de traitement des données [CHA 08]:

- *Nœuds* : ceux sont des capteurs, leur type, leur architecture et leur disposition géographique dépendent de l'exigence de l'application en question. Leur énergie est souvent limitée puisqu'ils sont alimentés par des piles.

- *Sink (Station de base)* : c'est un nœud particulier du réseau. Il est chargé de la collecte des données issues des différents nœuds du réseau. Il doit être toujours actif puisque l'arrivée des informations est aléatoire. C'est pourquoi son énergie doit être illimitée. Dans un réseau de capteur sans fils plus ou moins large et à charge un peu élevée, on peut trouver deux Sink ou plus pour alléger la charge.

- *Centre de traitement des données* : c'est le centre vers lequel les données collectées par la station de base sont envoyées. Ce centre a le rôle de regrouper les données issues des nœuds et les traiter de façon à en extraire l'information utile et exploitable.

Le centre de traitement peut être éloigné du Sink, alors les données doivent être transférées à travers un autre réseau, c'est pourquoi on introduit une passerelle entre le Sink et le réseau de transfert pour adapter le type de données au type du canal (comme c'est illustré dans la Figure I-2).

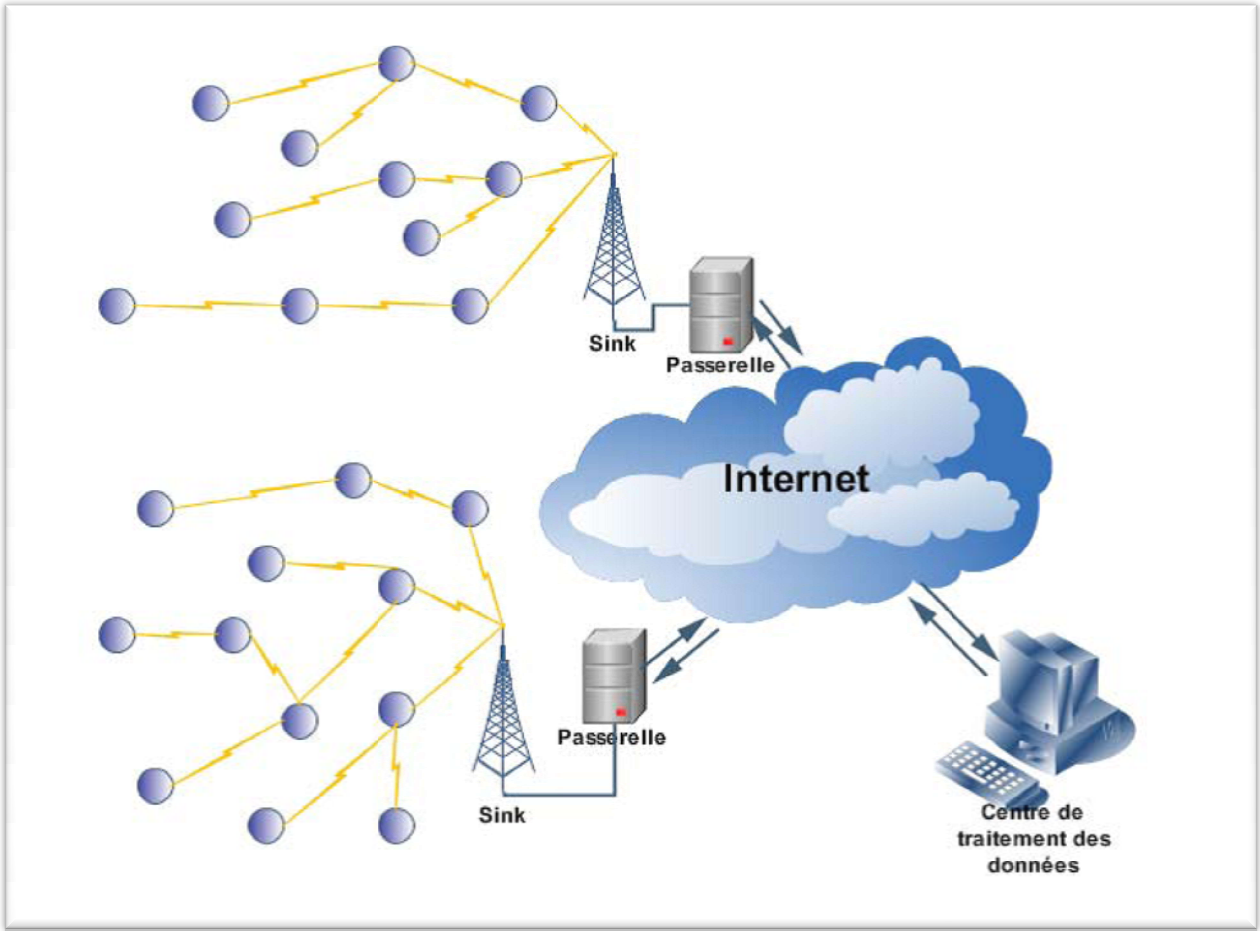


Figure I-2- Architecture générale d'un réseau de capteurs sans fils [CHA 08]

La Figure I-2 représente une architecture générale d'un RCSF où les nœuds capteurs transmettent leurs données vers un nœud Sink. Et puisque le centre de traitement des données est éloigné, les données sont acheminées via Internet, une passerelle est utilisée pour adapter le type des données au canal. La conception d'un réseau de capteurs, est influencée par beaucoup de facteurs, y compris les coûts de production, le passage à l'échelle, et l'environnement.

I-4- Topologies des réseaux de capteurs sans fils :

Les topologies des réseaux de capteurs sont déterminées à partir des protocoles de routage utilisés pour l'acheminement des données entre les nœuds et le Puit (Sink). Ces protocoles peuvent être Hiérarchique, Plate (Flat) ou Topologie basée sur la localisation.

I-4-1-Topologie Hiérarchique :

Les protocoles à topologie hiérarchique forment des réseaux dans lesquels un nœud central *Sink* (le niveau supérieur de la hiérarchie) est relié à un ou plusieurs autres nœuds qui appartiennent à un niveau plus bas dans la hiérarchie (deuxième niveau) avec une liaison point à point. Aussi, chacun des nœuds du deuxième niveau aura également un ou plusieurs autres nœuds de niveau plus bas dans la hiérarchie (troisième niveau) reliés à lui avec une liaison point à point. Chaque ensemble de nœuds forme une sorte de motif (Cluster). Le nœud central n'a aucun autre nœud au-dessus de lui dans la hiérarchie sauf le centre de traitement des données ou la passerelle si elle existe. Les nœuds du deuxième niveau jouent le rôle des passerelles entre ceux du troisième niveau et le Sink. Dans ce cas, le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de passer par les passerelles pour atteindre le nœud destination.

Un réseau basé sur une topologie hiérarchique doit avoir au moins trois niveaux dans sa hiérarchie, puisqu'un réseau avec un nœud central *Sink* et seulement un niveau hiérarchique au-dessous, forme une topologie en étoile [LEH 09].

Si les nœuds dans un réseau basé sur la topologie hiérarchique doivent effectuer un tel traitement sur les données transmises entre les nœuds dans le réseau, alors les nœuds qui sont à des niveaux plus élevés dans la hiérarchie doivent effectuer plus de traitement que les nœuds de niveau inférieur.

La figure I-3- montre que, les informations sont transmises d'un nœud capteur vers le nœud Sink (station de base) en passant par le *Clusterhead (chef de groupe)* déjà élu.

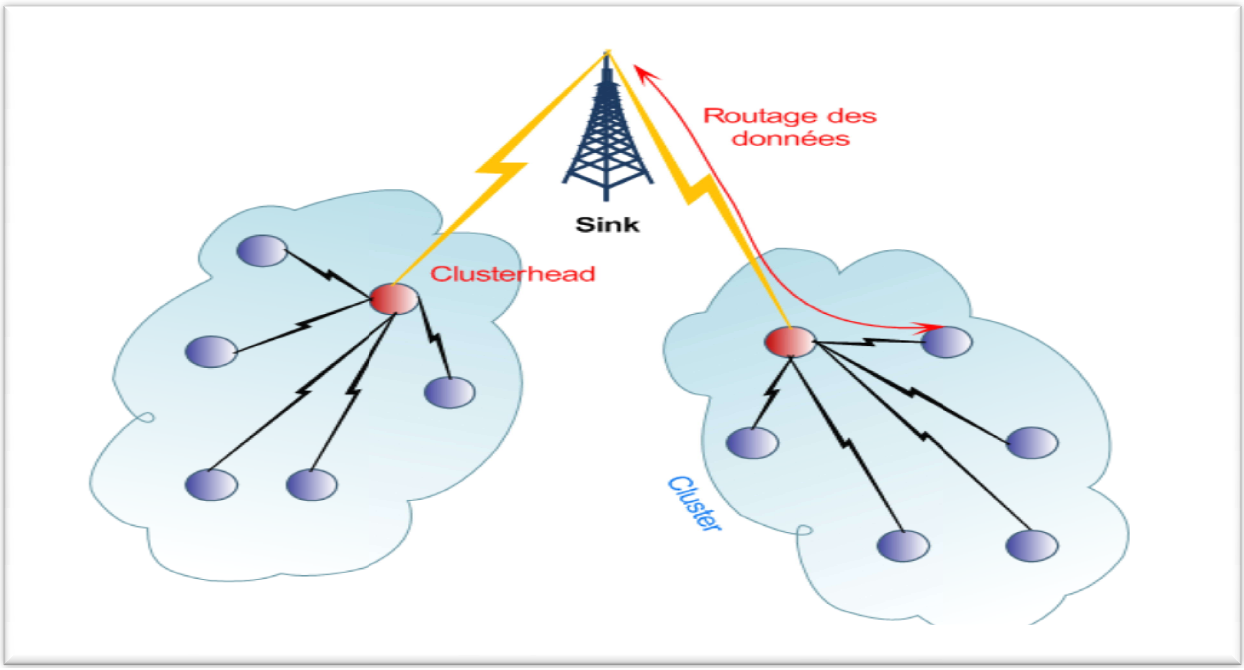


Figure I-3- Topologie Hiérarchique [CHA 08]

I-4-2-Topologie plate (Flat) :

Les protocoles à topologie plate (*flat*) considèrent que tous les nœuds sont égaux, ont les mêmes fonctions, et peuvent communiquer entre eux sans devoir passer par un nœud particulier ou une passerelle. Seul un nœud particulier, le *Sink*, est chargé de la collecte des données issues des différents nœuds capteurs afin de les transmettre vers les centres de traitement.

En cas où la destination ne fait pas partie du voisinage de la source, les données seront transmises en utilisant les sauts multiples à travers les nœuds intermédiaires comme c'est illustré dans la Figure I-4. Ce type de réseau représente l'avantage de l'existence de différents chemins d'une source vers une destination et c'est pour remédier au problème de changement brusque de topologie ou la défaillance d'un nœud intermédiaire [LEH 09].

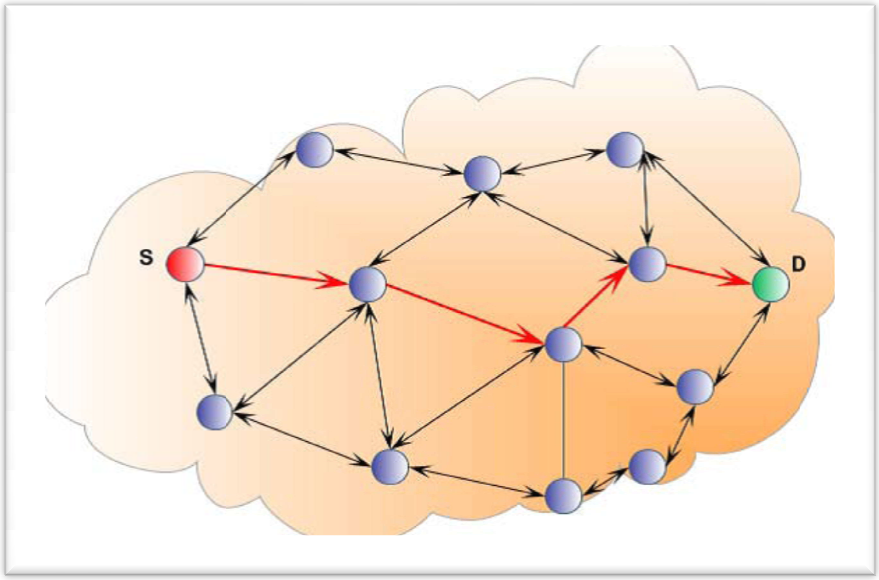


Figure I-4- Topologie plate (Flat) [CHA 08]

I-4-3- Topologie basée sur la Localisation : Dans cette topologie le réseau est supposé comme suit :

- Le réseau est partitionné en plusieurs zones de localisation.
- Chaque zone à son identifiant.
- Chaque nœud a un identifiant EUI (End-system Unique Identifier) et enregistre dynamiquement l'identifiant de la zone à laquelle il appartient temporairement.

L'information temporaire de localisation appelée LDA, [YOU 10] (*Location Dépendent Address*) qui est un triplet de coordonnées géographiques (longitude, latitude, altitude) obtenues, par exemple, au moyen d'un GPS avec une précision dépendant du type de l'application. Une telle topologie exige l'implémentation d'un algorithme de gestion de

localisation qui permet aux nœuds de déterminer les endroits approximatifs des autres nœuds. Ce type de topologie est mieux adapté aux réseaux avec une forte mobilité.

Avant d'envoyer ses données à un nœud destination, le nœud source utilise un mécanisme pour déterminer la localisation de la destination puis inclus l'identifiant de zone de localisation et du nœud destination dans l'entête du paquet à envoyer.

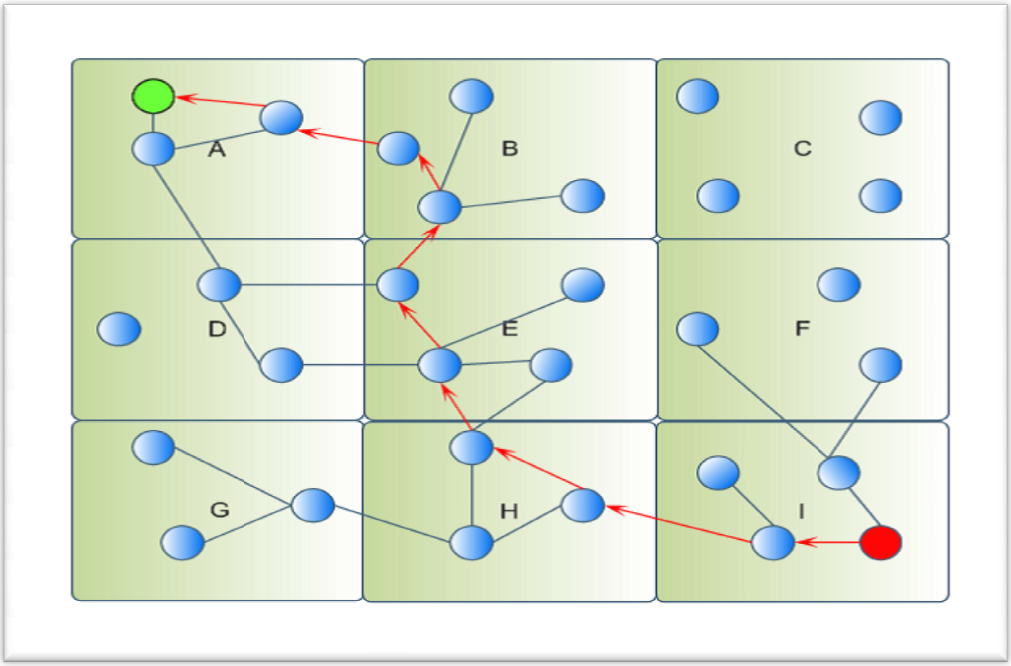


Figure I-5- Topologie Basée Localisation [CHA 08]

I-5- Caractéristiques des RCSFs [LEH 09] [ATH 10]*:*

Les principaux caractéristiques des réseaux de capteurs se résument dans ce qui suit :

I-5-1- Densité importante des nœuds :

Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important des nœuds pour garantir une couverture totale de la zone surveillée. Ceci engendre un niveau de surveillance élevé et assure une transmission plus fiable des données sur l'état du champ de capteur.

I-5-2- Topologie dynamique :

La topologie des réseaux de capteurs instable est le résultat des trois facteurs essentiels suivants [BEN 07]:

- *La mobilité des nœuds* **:** les nœuds capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent librement et arbitrairement, introduisant ainsi une topologie instable du réseau.
- *La défaillance des nœuds* **:** du fait de l'autonomie énergétique limitée des nœuds, la topologie du réseau n'est pas fixée (les nœuds « morts » sont, d'un point de vue logique, simplement supprimés).

- *L'ajout de nouveaux nœuds* **:** de nouveaux nœuds peuvent facilement être rajoutés. Il suffit de placer un nouveau capteur qui soit dans la portée de communication d'au moins un autre nœud capteur du réseau déjà existant.

I-5-3- Auto organisation :

Dans un très grand RCSF, il n'est pas possible ni d'organiser la structure selon une approche centralisée (trop coûteuse en énergie), ni de préserver une structure de communication « à plat » (topologie adaptée aux petits réseaux dans laquelle tous les nœuds ont le même rôle et les mêmes caractéristiques), car plusieurs problématiques sont encore plus critiques avec le passage à l'échelle et la contrainte d'énergie. C'est pour cette raison, que dans les réseaux de capteurs, une stratégie d'auto-organisation doit être définie [BEN 07].

I-5-4- Scalabilité (passage à l'échelle) :

Les réseaux de capteurs peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Un nombre aussi important engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que le nœud station de base soit équipé d'une mémoire importante pour stocker les formations reçues.

I-6- Composition d'un capteur sans fil :

I-6-1- schéma synoptique :

Les capteurs sont des dispositifs de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées, autonomes, capables de traiter des informations et de les transmettre, via les ondes radio, à une autre entité (capteurs, unité de traitements...) sur une distance limitée à quelques mètres [YOU 10].

Les réseaux de capteurs utilisent un très grand nombre de ces capteurs, pour former un réseau sans infrastructure établie. Un capteur analyse son environnement, et propage les données récoltées aux capteurs appartenant à sa zone de couverture. Chaque capteur relayant l'information sur sa propre zone de couverture, le réseau se trouve entièrement couvert.

Un capteur est composé de quatre unités de base (voir *Figure I-6*)

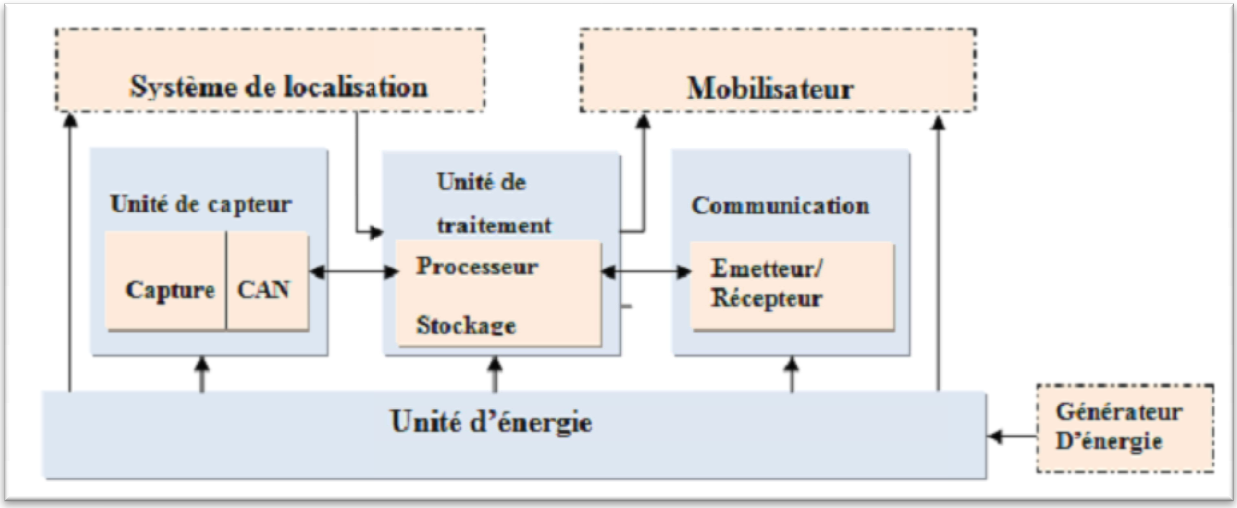


***Figure I-6- Schéma synoptique d'un nœud capteur* [YAS 07].**

a- L'unité d'acquisition des données: elle est généralement composée de deux sous-unités qui sont les capteurs et les convertisseurs analogique-numérique ADCs (Analog- Digital Converter). Les capteurs obtiennent des mesures sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques.

b- ***L'unité de traitement :*** l'unité de traitement est composée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de transmission. Cette unité est également composée d'un processeur et d'un système d'exploitation spécifique. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission. Les microcontrôleurs utilisés dans le cadre de réseaux de capteurs sans fil sont à faible consommation d'énergie. Leurs fréquences sont assez faibles, moins de 10 MHz pour une consommation de l'ordre de 1 mW. Une autre caractéristique est la taille de leur mémoire qui est de l'ordre de 10 Ko de RAM pour les données et de 10 Ko de ROM pour les programmes [HOL05]. Outre le traitement des données, le microcontrôleur commande également toutes les autres unités notamment le système de transmission et gère les procédures et protocoles permettant la communication entre les nœuds.

c- ***Un module de communication (Transceiver) :*** il est composé d'un émetteur/récepteur permettant la communication entre les différents nœuds du réseau via un support de communication radio. Le système de transmission consomme environ 15 mW et possède une portée de quelques dizaines de mètres.

d- ***L'unité d'énergie* :** La gestion de l'énergie est un point primordial dans les réseaux de capteurs. Tout capteur est muni d'une ressource énergétique à durée de vie limitée, et ce, à cause de la taille réduite de la batterie et l'impossibilité de la recharger ou de la changer. Il est à noter que la gestion de l'énergie est un réel problème pour les réseaux de capteurs, et divers travaux tentent d'y remédier**.** De ce fait, l'unité de contrôle d'énergie

est sans doute le composant le plus important du capteur. Elle s'occupe de la répartition de l'énergie au sein du capteur entre les divers modules. Elle permet également quelques fois de réduire la consommation d'énergie en agissant sur les modules inactifs. [DOU 06].

La figure -I-7 résume la consommation d'énergie dans les différentes unités d'un capteur.

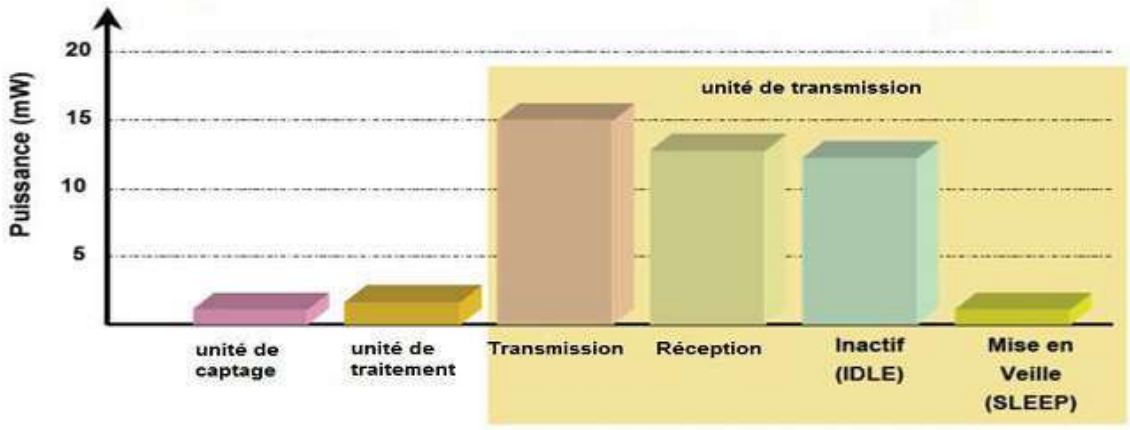


Figure I-7- Consommation d'énergie dans un nœud capteur. [BOU 07]

On remarque que l'unité de transmission est très gourmande en consommation d'énergie. En effet la transmission d'un seul bit sur une distance de 100m consomme approximativement la même énergie que l'exécution de 3000 instructions. Toutefois, la mise en veille de la radio réduit de manière significative cette consommation.

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels tels que les systèmes de localisation GPS (Global Position System) et un mobilisateur lui permettant le déplacement.

I-6-2- Description technique d'un capteur sans fil :

Par exemple :

- ***Capteur MicaZ :***

Un capteur MicaZ se compose de deux modules comme le montre la figure I-8-a : une carte MPR2600 et une carte MTS400 [LEH 09].

La carte MPR 2600 contient un microcontrôleur et un transceiver :

- ✓ Le microcontrôleur contient une mémoire flash de 128kB, une mémoire vive de 4kB et un processeur de 4MHz. Il réalise le calcul et le traitement des informations des capteurs.
- ✓ Le transceiver est un module de communication permettant des transmissions à fréquence radio de 2.4 GHz allant jusqu'à 250kbps entre les capteurs et des capteurs vers la station de base.

La carte MTS400 (carte des senseurs) capte des mesures environnementales : température, accélération, pression, luminosité et l'humidité, les transforme en valeurs numériques, puis elle les communique à la carte MPR 2600 (figure I-8-b).

Une nouvelle génération de carte MTS420 est également fournie chez Crossbow avec une fonctionnalité supplémentaire. Elle fonctionne comme une carte MTS400 et elle offre également la position géographique du capteur GPS.



Figure I-8-a- Capteur MicaZ [LEH 2009]

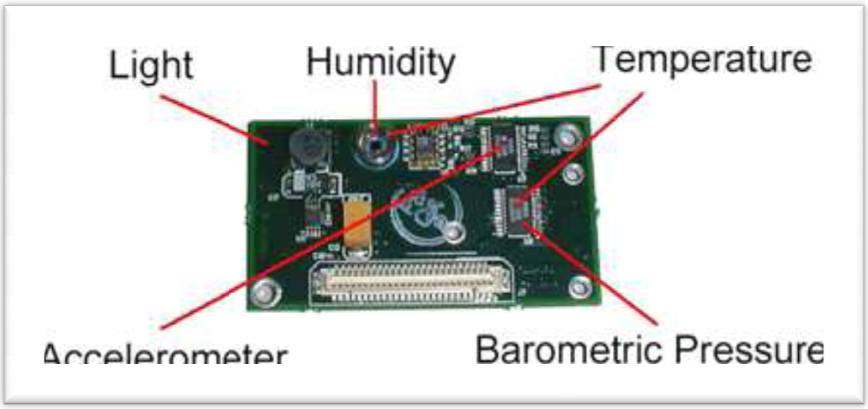


Figure I-8-b- Carte MTS400 [LEH 2009]

Station de base :

La station de base contient deux composants comme montre la figure I-9 : un pour récupérer les mesures transmises sans fil par les capteurs et l'autre pour envoyer les données à l'ordinateur [LEH 2009]:

- ✓ Le premier composant est une carte MPR2600 qui récupère les données transmises par les capteurs via des ondes radio.
- ✓ Le deuxième composant est une carte MIB520 qui est dotée d'une liaison filaire vers l'ordinateur via un câble USB. Cette carte reçoit des données de la carte MPR2600 et

les transmet à l'ordinateur via le câble USB. Elle sert également à injecter des programmes sur les capteurs MicaZ afin d'accomplir des tâches bien précises.



Figure I-9- Station de base [LEH 09]

- ***Capteurs MSP430F2274 [GUE 12]:***

L'eZ430 qui est de la taille d'une clé USB est une plateforme sans fil permettant de programmer le microcontrôleur MSP430F2274 de Texas Instruments.

Elle comporte un transmetteur sans fil 2,4 GHz : CC2500. En effet, il sert de programmateur, de débuggeur et de simulateur pour le MSP430F2274. C'est un système de développement pas cher : environ une vingtaine d'euros.

Construit autour d'un CPU 16 bits, le MSP430 à été conçu pour des applications embarquées à basse consommation et à faible cout. Il est particulièrement adapte aux applications sans fil fonctionnant sur batteries.

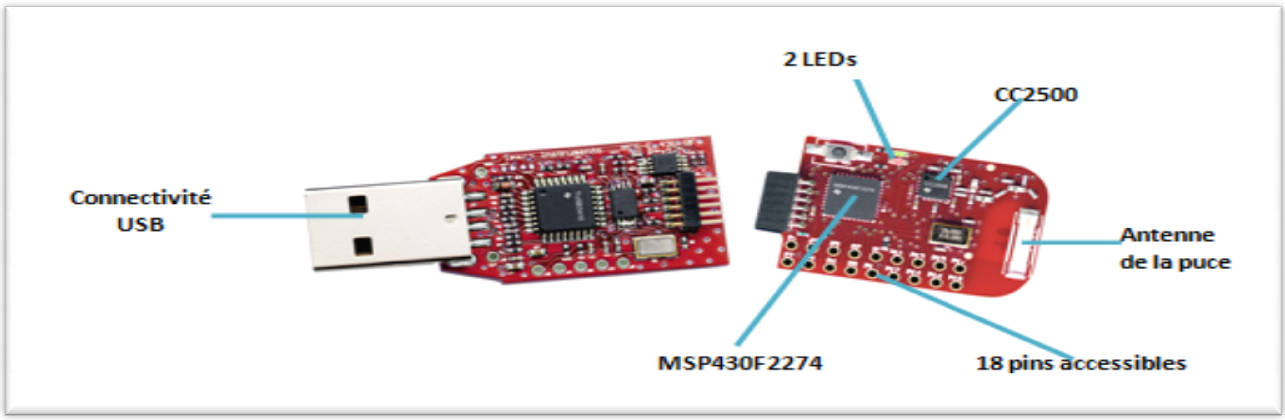


Figure I-10- composition matérielle du MSP430F2274 [TOH 10]

Le code en langage C est programmé, compilé puis chargé dans la ROM du microcontrôleur MSP430-F2274 du capteur par l'intermédiaire du programmateur eZ430-RF2500.

Composition matérielle de la plateforme eZ430-RF2500 :

- ✓ Une interface USB de programmation et de débogage ne nécessitant aucune installation de pilote.
- ✓ 18 pins accessibles
- ✓ Une antenne de la puce
- ✓ Le microcontrôleur MSP430
- ✓ 2 Timers : Timer A et Timer B
- ✓ Le transmetteur sans fil CC2500
- ✓ 2 pins d'entrée/sortie connectés aux LEDs rouge et verte pour un feedback visuel

I-7- Les standards de communication pour les RCSFs *:*

Il y a une multitude de normes sans fil comme le Wi-Fi(le standard IEEE 802.11) et le WiMax (le standard IEEE 802.16) qui s'adresse au transport des données à haut débit.

Certains dispositifs comme les capteurs n'ont pas besoin d'une largeur de bande très élevée, mais plutôt d'un temps de latence faible ainsi qu'une consommation d'énergie très basse, pour une longue durée de vie sur batterie et un grand nombre de dispositifs. D'où la nécessité de concevoir d'autres normes sans fil capables de répondre à ces exigences. Parmi les standards les plus aptes à être exploités dans les réseaux de capteurs sans fil se retrouvent les standards *Bluetooth* et *ZigBee,* présentés ci-après [OUA 09] [SOH 07].

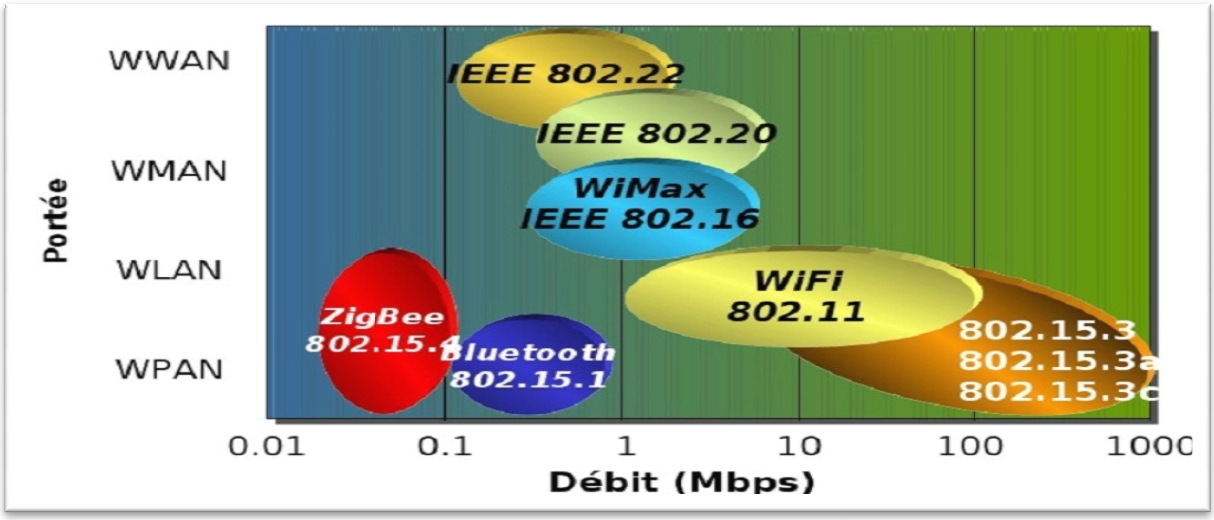


Figure I-11- Les différentes normes sans fil. [CED 08]

I-7-1 Bluetooth :

Le Bluetooth [CHA 88] est un standard de communication sans fil utilisant une technologie radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre les appareils électroniques. Il représente l'équivalent de l'USB mais sans fil et sert donc à relier des périphériques avec un ordinateur ou d'autres périphériques (imprimantes, scanners, claviers, souris, téléphones portables, PDA, …). Le succès de la technologie Bluetooth l'a amené à être utilisée dans le cadre des LAN (Local Area Network) sans fil. L'avantage du Bluetooth par rapport au Wi-Fi, qui offre apparemment de meilleures performances, se trouve au niveau de la consommation : en effet, la connexion sans fil est surtout utilisée pour les appareils mobiles, et donc n'étant pas directement reliés au secteur. Par conséquent, la technologie Bluetooth a une plus faible consommation que le Wi-Fi. Le second avantage est le prix attractif de cette technologie grâce à son faible coût de réalisation des puces. Cependant, cette faible consommation d'énergie ne répond pas encore à des exigences des capteurs. En plus de cette consommation d'énergie, la technologie Bluetooth soufre d'un problème de passage à l'échelle.

I-7- 2- ZigBee :

Beaucoup moins connue que Bluetooth, ZigBee est le nom d'une suite de protocoles de hauts niveaux basée sur le standard IEEE 802.15 [RIL 00], [NEF 07]. Pour les réseaux personnels sans fil (Wireless Personal Area Network : WPAN). La technologie ZigBee a pour but la communication à courte distance telle que le propose déjà la technologie Bluetooth, tout en étant moins chère et plus simple. Les nœuds sont conçus pour fonctionner plusieurs mois (Jusqu'à deux ans) en autonomie complète grâce à une simple pile de 1,5V. Sa très faible consommation électrique et ses coûts de production très bas en font une candidate idéale pour les RCSFs. Le petit débit qu'il offre (250Kbps théorique contre 1Mbps pour Bluetooth), n'est pas vraiment un handicap pour un réseau de capteurs puisque la taille des paquets échangés n'est pas vraiment importante

Pour montrer l'intérêt du ZigBee dans son aspect économique du point de vue énergétique, voici un tableau comparatif chiffré entre différents normes de communication sans fil.

	ZigBee	GSM/GPRS	Wi Fi	Bluetooth
Ressources systèmes	4 Ko – 32 Ko	+ 16 Mo	+ 1 Mo	+ 250 Ko
Durée de vie de la batterie	100 à + 1000 jours	1 à 7 jours	0,5 à 5 jours	1 à 7 jours
Taille du réseau	Illimité (2^{64})	1	32	7
Bande passante	20 à 250 Ko/s	64 à > 128 Ko/s	> 11000 Ko/s	720 Ko/s
Portée	1 à > 100 mètres	> 1000 mètres	1 à 100 mètres	1 à > 10 mètres

Tableau I-1- Tableau comparatif chiffré entre différents protocoles de communication sans fil. [CED 08]

Au vu de ce tableau on comprend qu'on retrouve naturellement ce protocole dans des environnements embarqués où la consommation énergétique est primordiale et où le nombre de membres du réseau est important.

En 2005, une estimation du coût unitaire pour un nœud ZigBee a révélé un prix de 1,10 $ par unité dans le cadre d'une production en très grand nombre. Il faut ajouter le prix du microcontrôleur qui commande le circuit, ce qui augmente légèrement le prix. À titre de comparaison, la technologie Bluetooth, lancée en 1998, annonçait à cette époque un prix unitaire de production compris entre 4 et 6 $, maintenant redescendu à moins de 3 $.

I-8- Le système d'exploitation pour RCSF : TinyOS

TinyOS est un système d'exploitation open-source conçu pour des réseaux de capteurs sans fil. Il respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant la taille du code nécessaire à sa mise en place. Cela s'inscrit dans le respect des contraintes de mémoires qu'observent les réseaux de capteurs [CHA 08].

Pour autant, la bibliothèque de composant de TinyOS est particulièrement complète puisqu'on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. L'ensemble de ces composants peut être utilisé tel quel, il peut aussi être adapté à une application précise.

En s'appuyant sur un fonctionnement événementiel, TinyOS propose à l'utilisateur une gestion très précise de la consommation du capteur et permet de mieux s'adapter à la nature aléatoire de la communication sans fil entre interfaces physiques.

Disponibilité et sources : TinyOS est un système principalement développé et soutenu par l'université américaine de Berkeley, qui le propose en téléchargement sous la licence BSD et en assure le suivi. Ainsi, l'ensemble des sources sont disponibles pour de nombreuses cibles matérielles [ATH 10].

Event-driven : Le fonctionnement d'un système basé sur TinyOS s'appuie sur la gestion des évènements se produisant. Ainsi, l'activation de tâches, leur interruption ou encore la mise en veille du capteur s'effectue à l'apparition d'évènements, ceux-ci ayant la plus forte priorité. Ce fonctionnement évènementiel (event-driven) s'oppose au fonctionnement dit temporel (time-driven) où les actions du système sont gérées par une horloge donnée.

Consommation : TinyOS a été conçu pour réduire au maximum la consommation en énergie du capteur. Ainsi, lorsqu'aucune tâche n'est active, il se met automatiquement en veille.

I-9- Pile protocolaire :

La pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la Figure I-10 [ATH 10].

Les RCSF utilisent une architecture de communication en couches, ce sont les cinq premières couches du modèle OSI ; la couche physique, la couche liaison de données, la couche réseau, la couche transport et la couche application. Chaque couche a son propre rôle et ses propres protocoles pour atteindre son objectif.

De plus, cette pile possède trois plans (niveaux) de gestion, le plan de gestion des tâches qui permet de bien affecter les tâches aux nœuds capteurs, le plan de gestion de mobilité qui permet de garder une image sur la localisation des nœuds pendant la phase de routage et le plan de gestion de l'énergie qui permet de conserver le maximum d'énergie.

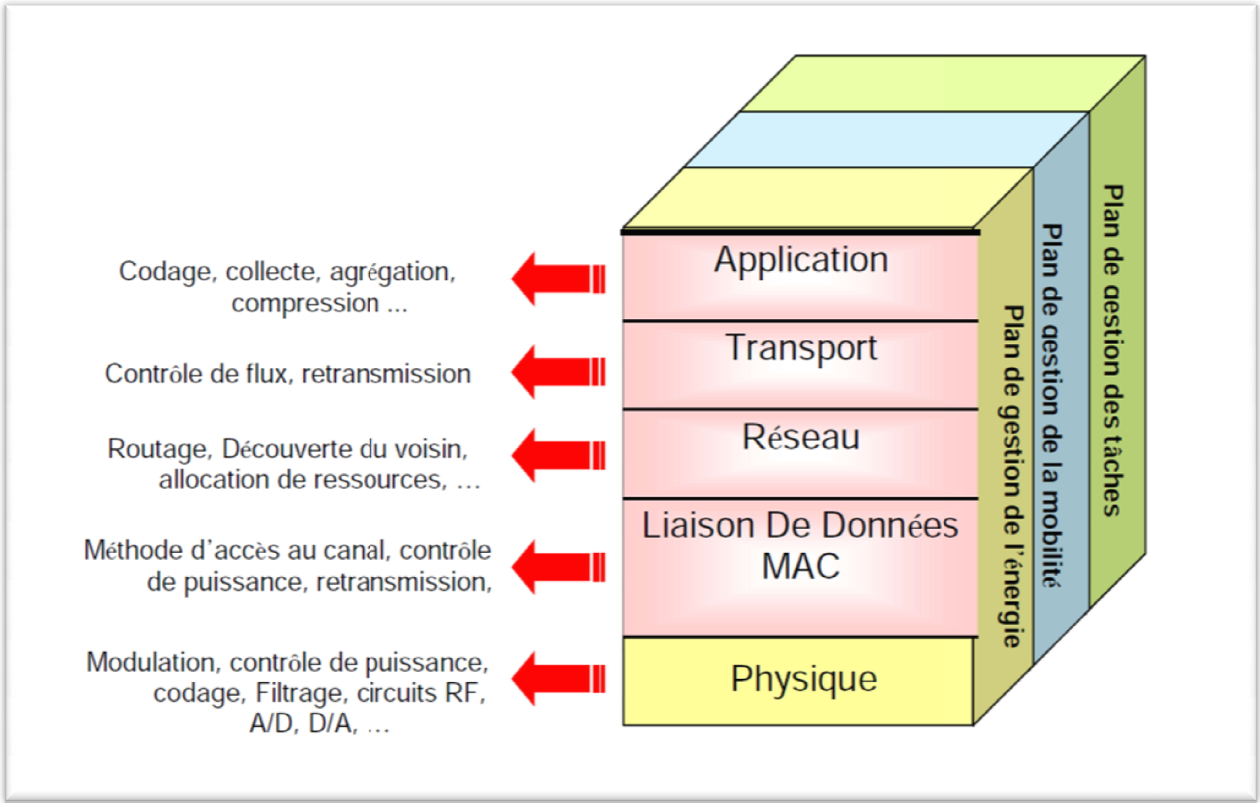


Figure I-12- Pile protocolaire des RCSF [BOU 10].

I-9-1 - Couche physique :

La couche physique est responsable du choix de la fréquence (La sélection des fréquences), de la génération des ondes porteuses, de la détection du signal, de la modulation et du chiffrage des données. Dans un réseau de capteurs sans fil, les nœuds communicants sont liés par un médium sans fil. Ces liens peuvent être constitués par les ondes radio ou des signaux infrarouges.

I-9-2 - Couche liaison de données :

La couche liaison de données est principalement responsable de :

- Multiplexer le flux de données.
- Détecter et verrouiller les trames de données.
- Contrôler l'accès au support de transmission (Media Access Control).
- Assurer une connexion fiable (point-à-point ou point-à-multipoints) selon la topologie du réseau de capteurs.
- Contrôler les erreurs.

I-9-3 - Couche réseau :

Les nœuds capteurs sont disséminés, avec une grande densité dans un domaine se situant au voisinage ou à l'intérieur de la région spatiale où se produit le phénomène à observer. Des protocoles spéciaux multi-sauts de routage entre les nœuds capteurs et le nœud puit sont nécessaires. Les techniques de routage ad-hoc ne se conforment pas habituellement aux contraintes des réseaux de capteurs.

La couche réseau en ce qui concerne les réseaux de capteurs est habituellement conçue selon les principes suivants [BOU 10]:

• L'efficacité d'énergie est toujours une considération importante.
• Les réseaux de capteurs sont la plupart du temps data-centric.
• L'agrégation de données (le clustering) est une fonctionnalité majeure.

I-9-4 - La couche transport :

La couche transport fournit un service de communication de bout en bout, fiable pour l'application. Elle manipule la segmentation des grands paquets. Elle effectue le contrôle des flots de données de bout en bout afin d'éviter la surcharge du récepteur ou du réseau. Dans les réseaux sans fil, le contrôle du flot ne fonctionne pas comme dans les réseaux câblés parce que les paquets retardés ne doivent en aucun cas congestionner le réseau. Aujourd'hui, la plupart des applications qui ont été suggérées pour des réseaux de capteurs essayent de maintenir des paquets très petits et de les envoyer peu abondamment.
C'est pourquoi la couche transport n'a pas la même importance dans les réseaux de capteurs comparativement à l'Internet.

I-9-5 - La couche application :

La couche application constitue l'ensemble des applications implémentées sur un réseau de capteurs. Ces applications doivent fournir des mécanismes permettant à l'utilisateur d'interagir avec le réseau de capteurs à travers différentes interfaces, et éventuellement, par l'intermédiaire d'un réseau étendu (par exemple ; Internet). Elles permettent également de rendre transparents les mécanismes de communication dans les couches inférieures. Tout ceci, en offrant des interfaces pour la création et la diffusion de requêtes [HAM 07].

I-9-6 - Gestion d'énergie :

La couche de gestion d'énergie contrôle la manière d'utiliser l'énergie par le nœud capteur, et gère la consommation d'énergie selon le mode de fonctionnement employé (capture, calcul, et communication par radio) [BOU 10]. Par exemple pour éviter de recevoir des messages redondants, le nœud capteur change son mode en « Off » après une réception d'un message d'un de ses voisins. En outre un nœud capteur annonce à ses voisins qu'il a atteint un bas niveau d'énergie, par conséquence il ne va pas participer au routage des données, et l'énergie restante va être utilisée pour capter et détecter des tâches.

I-9-7 - Gestion de mobilité :

La couche de gestion de mobilité détecte et enregistre le mouvement/mobilité des nœuds capteurs. En utilisant ces positions, les nœuds capteurs peuvent connaitre qui sont leurs voisins. Parfois une auto-organisation des nœuds est nécessaire à cause de la destruction de quelques nœuds. Dans ce cas, la couche de gestion de mobilité doit être capable de faire changer la position des nœuds.

I-9-8 - La gestion des tâches :

La couche de gestion des tâches assure la coopération des efforts des nœuds capteurs, elle ordonnance les événements captés, et les tâches détectées dans une zone de capture spécifique. Par conséquent, les nœuds capteurs qui appartiennent à la même zone de capture ne sont pas obligés d'effectuer les tâches de capture en même temps. Selon leur niveau d'énergie, quelques nœuds capteurs peuvent accomplir des tâches de capture mieux que d'autres.

I-10- Connectivité du RCSF :

Dans un réseau de capteurs, le principal défi est de réaliser un ensemble de tâches tout en dépensant le moins possible d'énergie. Par exemple, lorsque l'ensemble des capteurs transmet simultanément de l'information, on peut assister à l'apparition d'interférences ou de collisions engendrant une perte significative de l'information transmise. Une mise en veille de certains capteurs devient nécessaire. Ceci conduit au problème de la couverture complète de la zone de déploiement, et cela d'une manière connexe, en dépit de capteurs inactifs. Une extension des solutions basées sur la construction de couvertures logiques (overlays) sensibles à la dégradation énergétique semble prometteuse.

Un réseau de capteurs est dit connecté si et seulement s'il existe au moins une route entre chaque paire de nœuds**.** La connectivité dépend essentiellement de l'existence des routes. Elle est affectée par les changements de topologie dus à la mobilité, la défaillance des nœuds, les attaques, etc. Ce qui a pour conséquences : la perte de liens, l'isolement des nœuds, le partitionnement du réseau, la mises à jours des routes et le routage, . . . etc.

Un graphe G est dit k-connecté, s'il y a au moins k disjoint chemins entre deux nœuds quelconques v, u Є *V*. La connectivité est une mesure de tolérance aux fautes ou de diversité de chemin dans le réseau [YOU 10]. Le 1-connectivité est une condition fondamentale pour que le réseau soit opérationnel. En effet la connectivité d'un réseau s'exprime de la façon suivante :

$$\mu(R) = \frac{N.\pi.R^2}{A}$$

Où :

- ***R*** *le rayon de transmission d'un nœud*
- ***A*** *l'aire de calcul*
- ***N*** *le nombre de nœuds situé dans l'aire A*

I-11- La localisation dans les RCSFs :

Dans cette phase les capteurs communiquent entre eux et collectent différents indicateurs de qualité des communications radios. Le hardware radio peut rapporter diverses informations sur le signal radio entre deux nœuds.

En effet le simple fait qu'ils communiquent entre eux nous indique qu'ils sont à portée radio l'un de l'autre. De plus le hardware radio des capteurs peut nous rapporter diverses caractéristiques à propos du signal radio entre les deux nœuds, à partir desquelles les distances séparant les nœuds peuvent être estimées. L'estimation se fait en fonction des propriétés du signal. Le temps de propagation, l'atténuation ou la forme sont évaluées au niveau du nœud pour déduire cette distance [VAN 07].

Il existe deux grandes familles d'estimation des distances entre les nœuds capteurs du réseau : [VAN 07]

- Estimation des distances à partir des liens de communications.
- Calcul des distances manquantes.

En **annexe** vous trouverez une explication détaillée sur l'estimation des distances entre les nœuds capteurs du réseau.

I-12- Les applications des RCSF :

Le déploiement rapide des RCSFs autonomes a faible prix, même sur une très grande échelle géographique, a été la source d'émergence de plusieurs applications différentes en termes des besoins et des caractéristiques. On cite ci-dessous les principaux domaines d'application des RCSFs

I-12-1 Contrôle de l'environnement :

Dans ce domaine, les capteurs peuvent être exploités pour détecter les catastrophes naturelles (feux de forêts, tremblements de terre, …), traquer les mouvements des animaux et surveiller les conditions d'environnement qui affectent les récoltes, les stocks et tout autre système d'agriculture

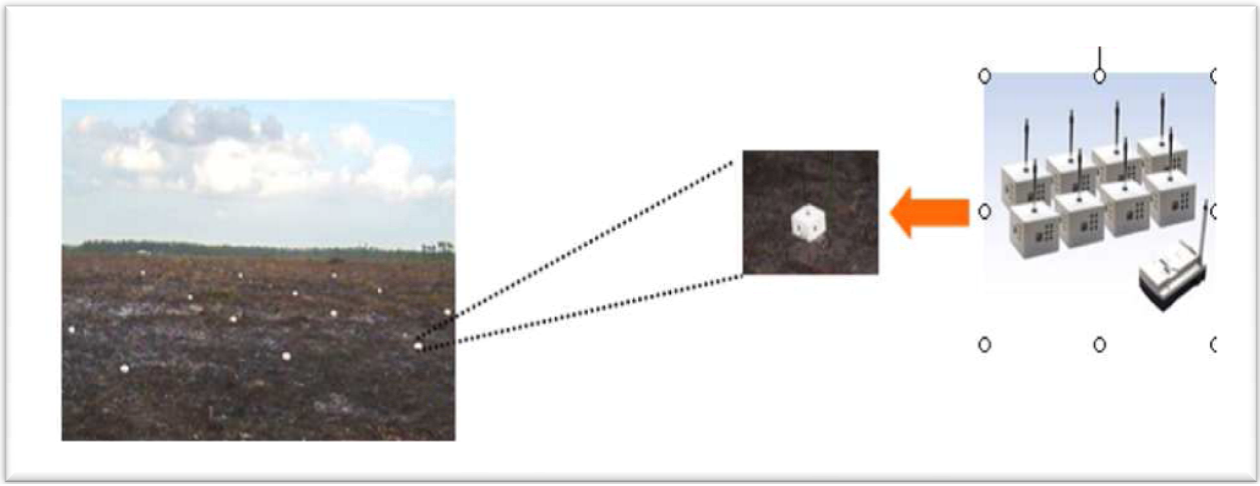


Figure I-13- Contrôle de l'environnement [OUA 09].

I-12-2 Militaire :

Pour les services de sécurité, la détection de dangers chimiques, etc. ...

Par exemple :

- La surveillance des munitions et des équipements militaires.
- L'évaluation des dommages.
- La connaissance de la position de ses propres soldats.
- Repérage des cibles



Figure I-14- Un service militaire utilisant les RCSF [YAC 12]

I-12-3 Santé :

Cette technologie consiste en la surveillance de la température, la fréquence cardiaque, l'oxygénation du sang et le pouls du patient,…etc.

- repérage et surveillance des médecins et des patients dans les hôpitaux;
- télésurveillance des données physiologiques humaines.

Par exemple :

On peut placer sur le corps d'un patient des capteurs qui surveille constamment sa température, sa fréquence cardiaque, l'oxygénation du sang et son pouls.

Un émetteur-récepteur transmet les données à une station de base branchée à un ordinateur personnel ou poste des soins infirmier ou même à un assistant numérique.

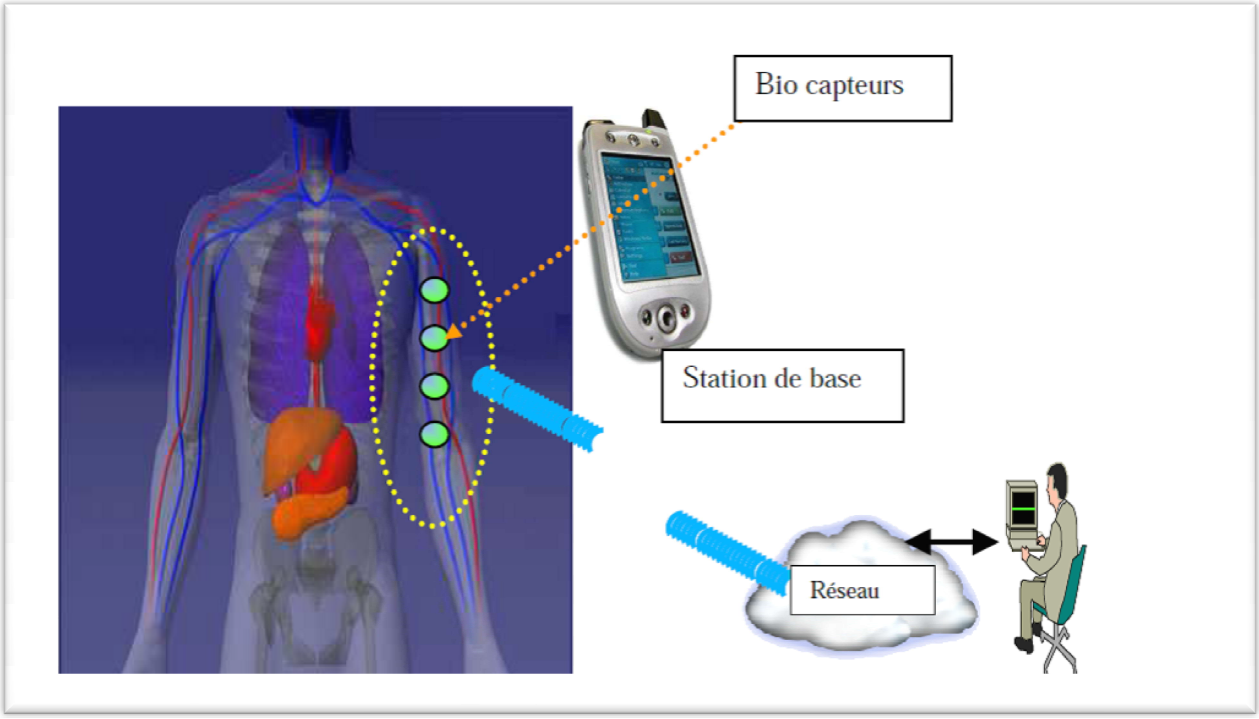


Figure I-15- Application des RCSF dans le domaine de la médecine [YAC 12].

I-12-4 Applications industrielles :

Pour gérer la circulation, la direction d'un objet, la lumière, etc.

Par exemple *:*

Contrôle de la pollution : On pourrait disperser des capteurs au-dessus d'un emplacement industriel pour détecter et contrôler des fuites de gaz ou de produits chimiques. Ces applications permettraient de donner l'alerte en un temps record et de pouvoir suivre l'évolution de la catastrophe.

I-12-5 La sécurité des infrastructures:

Les RCSF est un candidat prometteur pour assurer la sécurité des bâtis stratégiques contre toute attaque à caractère terroriste. En effet, un réseau de cameras vidéo, capteur acoustiques ou autres types de capteurs peuvent être déployés facilement autour de ces bâtiments pour détecter toute intrusion en temps record et avec une précision imbattable.

Le grand nombre de capteurs réduit énormément les fausses alertes grâce à une fusion d'informations; les nouveaux capteurs peuvent également détecter les attaques d'ordre biologique, chimique ou nucléaire [SOH 07].

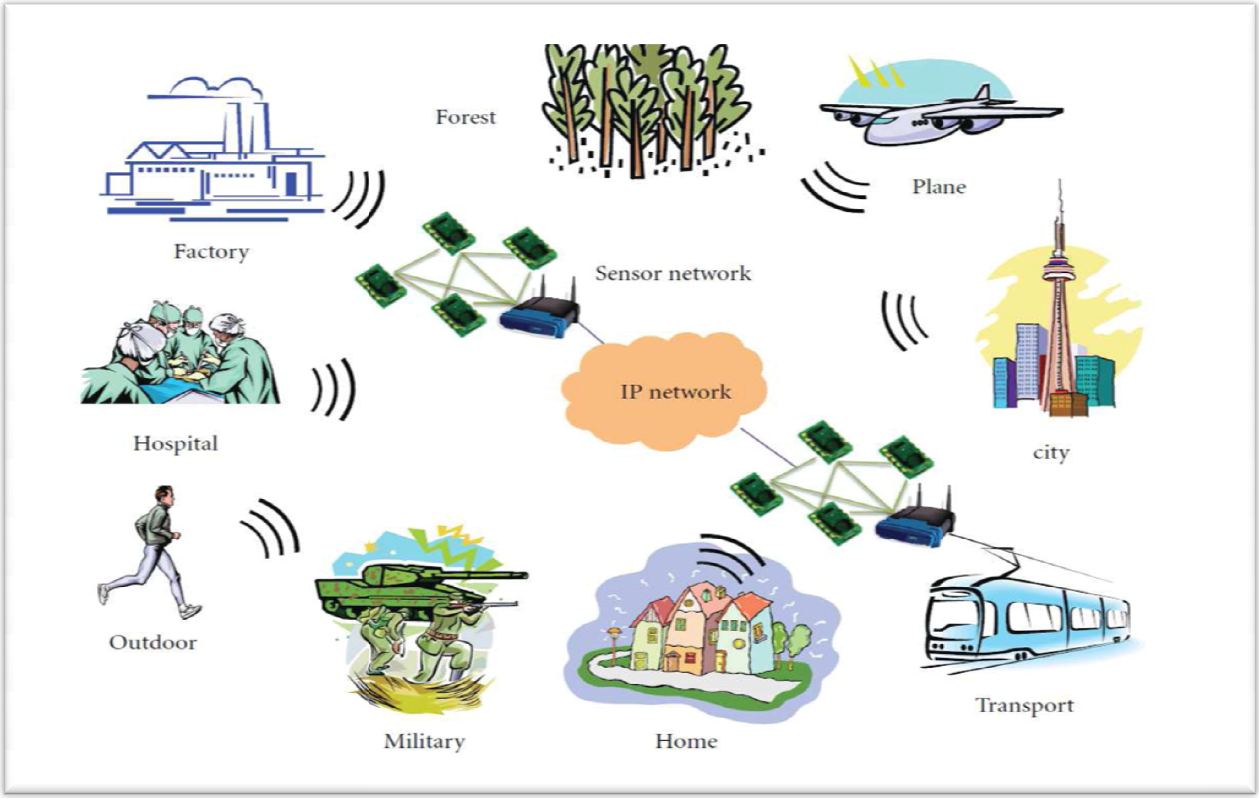


Figure I-16- Quelques domaines d'application pour les RCSF [YAC 12]

I-13- Classes d'applications des RCSF *[YAC 12]*:

I-13-1 Applications orientées temps (time driven)**:**

Cette classe représente les applications où l'acquisition et la transmission des données capturées sont liées au temps : instant précis, période d'acquisition [SOH 07]. Cette période d'acquisition peut être plus au moins longue selon l'application (de quelques secondes jusqu'à quelques heures voire des jours). Ainsi, la quantité de données échangées dans le réseau dépend de la périodicité des mesures à effectuer sur l'environnement local. La collecte de données environnementales peut représenter un bon exemple de cette classe d'application dans des domaines variés : agriculture, expérimentation scientifique, etc.

I-13-2 Applications orientées événements (event driven)**:**

Dans ce cas, les capteurs envoient leurs données seulement si un événement spécifique se produit. On peut citer l'exemple de surveillance des feux dans les forêts où un capteur envoie des alarmes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil. Au départ, cette classe d'application était conçue à des fins militaires, comme la surveillance du déplacement d'objets dans le champ de bataille. Par la suite, cette classe a rapidement trouvé de nouvelles perspectives comme le contrôle industriel, le contrôle médical des patients, la surveillance d'édifices (barrages, ponts, voies de chemins de fer, etc.).

I-13-3 Applications orientées requêtes :

Dans ce cas, un capteur envoie de l'information uniquement suite à une demande explicite de la station de base. Cette classe d'application est destinée aux applications adaptées à l'utilisateur. Ce dernier peut requérir des informations à partir de certaines régions dans le réseau ou interroger les capteurs pour acquérir des mesures d'intérêts. Dans ce cas, des connaissances sur la topologie du réseau et l'emplacement des capteurs sont nécessaires.

I-13-4 Applications hybrides :

Ce type d'application met en œuvre les trois modes de fonctionnement décrits précédemment. Par exemple, dans un réseau conçu pour le suivi d'objets, le réseau peut combiner entre un réseau de surveillance (time driven) et un réseau de collecte de données par événements (event driven) [SOH 07]. Par exemple, pendant les longues périodes d'inactivité des capteurs et lorsque aucun objet n'est présent, le réseau peut assurer une fonction de surveillance.

I-14 Problématiques :

Pour réaliser des systèmes capables de fournir de telles applications, un certain nombre d'obstacles doivent être levés. Les plus importants sont : [PAR 05]

- ***La topologie dynamique :*** La mobilité des nœuds, la possibilité d'étendre le réseau par ajout de nouveaux nœuds et la suppression de nœuds défaillants changent fréquemment la topologie des réseaux. Ceci nécessite une maintenance permanente pour assurer le bon fonctionnement des réseaux de capteurs.
- ***L'environnement :*** Les nœuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement : forte chaleur, pluie,...etc.
- ***La consommation d'énergie :*** Un capteur, de part sa taille, est limitée en énergie. Dans la plupart des cas, le remplacement de la batterie est impossible, ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend de la durée de vie de sa batterie. Les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens d'optimiser la consommation d'énergie par les nœuds capteurs.
- ***Le routage*** : Pour obtenir une consommation énergétique minimale.

Tous ces thèmes sont des domaines de recherche actifs. Dans la suite, nous nous intéresserons particulièrement aux problèmes d'auto-organisation

I-15- Conclusion :

La flexibilité, le prix réduit et les caractéristiques rapides de déploiement des réseaux de capteurs offrent des possibilités infinies de développement dans tous les domaines d'application. Ceci nous permet de penser que les réseaux de capteurs feront bientôt partie intégrante de nos vies et satisferont sûrement les plus grands projets.

Cependant, la réalisation des réseaux de capteurs doit satisfaire quelques contraintes parmi lesquelles on peut citer : la consommation d'énergie, le changement de topologie, la densité importante des nœuds réseaux... Ces contraintes exigent qu'une auto-organisation des réseaux de capteurs soit mise au point.

Nous nous intéressons, Dans le deuxième chapitre de ce projet, à la présentation des différents principes et objectifs de l'auto-organisation, la Techniques de clusterisation.

.

Chapitre II

Technique D'auto-organisation

Des RCSF

Chapitre II

Techniques D'auto-organisation Des RCSFs

II-1- Introduction :

Les réseaux de capteurs sans fil sont généralement déployés aléatoirement et en grand nombre dans une zone d'intérêt pour la surveillance d'un événement ou l'acquisition périodique des données environnementales. Ces capteurs s'auto-organisent et collaborent ensemble pour former un réseau de capteurs capables d'envoyer les données collectées à la station de base.

Cependant, le déploiement des réseaux de capteurs exige des solutions pour un certain nombre de défis. Ces solutions dépendent des contraintes imposées par les capteurs : petite capacité de stockage, basse capacité de traitement, durée de vie limitée de la batterie et portée radio réduite, ainsi que leur topologie dynamique à cause de la mobilité des capteurs qui peuvent être placés sur des patients, des animaux, ou des véhicules. Ainsi, le traitement de ces défis exige une technique efficace permettant l'économie de l'énergie. **L'architecture basée sur la clusterisation** est considérée comme une approche prometteuse d'auto-organisation des réseaux de capteurs sans fil même avec un nombre de nœuds très important [KAR 04], [GUI 12] , le système (le réseau) doit continuer à fonctionner efficacement (Propriété de Passage à L'échelle)

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord quelques notions et définition qui sont nécessaires à la présentation de l'auto-organisation des réseaux de capteurs basés sur la **proche de clusterisation**, et on termine par une introduction sur le protocole d'auto-organisation LEACH, et les protocoles SEP, Z-SEP qui nous s'intéressent pour l'évaluation des performances de protocole auto-organisateur LEACH.

II-2- Définition et objectifs de l'auto-organisation

II-2-1- Définition :

Si l'on s'intéresse aux définitions classiques de l'organisation, un système est dit organisé s'il possède une structure et un ensemble de fonctions associés. [VAL 07] La structure à pour objet de structurer toutes les entités et faciliter leurs interactions. Les fonctionnalités ont pour but de maintenir la structure et de favoriser son usage pour répondre à des besoins déterminés. La notion d'auto-organisation fait référence à l'organisation d'un système sans interaction d'une entité extérieure et sans contrôle centralisé. Ainsi, l'auto-organisation doit nécessairement être basée sur des interactions locales, de façon complètement distribuée.

C'est la définition que nous adopterons. Notons qu'elle diverge du point de vue assez commune rencontre : un réseau auto-organise est souvent perçu comme un réseau où les nœuds s'adaptent au changement de topologie de façon localisée ou distribuée comme un mécanisme de découverte de routes.

II-2-2- Principes et objectifs :

On attend d'un système auto-organise plus que de simples interactions locales sans contrôle extérieur. En particulier nous souhaitons, ici, faire émerger un comportement global à partir des différentes interactions locales. Typiquement et dans le cas des réseaux radio multi sauts, a partir d'échanges d'informations localisées nous souhaitons faire émerger une structure *virtuelle* permettant d'organiser le réseau. Plus généralement [VAL 07], toute fonction ***f*** qui permet de passer d'un espace physique à un espace logique peut s'avérer pertinente. Ainsi, nous arrivons à construire deux vues du réseau : une vue *locale*, représentant la dynamique des nœuds et une autre, *globale*, possédant des propriétés que nous détaillerons par la suite.

Bien entendu, cette structure émergente doit s'adapter à l'environnement et réagir aux changements locaux. Plus précisément, un changement local ne doit entrainer qu'une modification locale de la structure et ne pas impacter sur son intégralité. Cette réaction dynamique aux changements locaux en un temps suffisamment court et borne entraine la propriété d'adaptabilité.

Le système apparait alors comme robuste : la structure émergente (vue locale) est stable car le mécanisme d'auto-organisation va permettre de réagir aux cas de défaut d'un lien ou d'un nœud du réseau (dus à la mobilité, au manque d'énergie, ...) : la structure va s'adapter et se reconstruire localement. Comme il n'y a pas d'entité centrale, dans un système auto-organise il n'y a pas de nœuds critiques et le système peut être réparé sans aide extérieure.

Nous regroupons les propriétés d'adaptabilité et de robustesse sous le terme d'auto-stabilisation ou les fautes sont associées aux liens et aux nœuds [VAL 07].

Si nous considérons l'auto-organisation sous l'angle de la construction d'une topologie stable fédérant du réseau, cette topologie émergeant des interactions locales doit être partagée par l'ensemble des nœuds. Autrement dit, nous devons bannir toute construction orientée source.

Finalement, la dernière propriété importante que doit posséder une structure auto-organisée c'est celle de supporter le passage à l'´echelle. Cette propriété découle de l'absence de contrôle centralisé et des interactions locales. Les propriétés que doivent posséder un schéma d'auto-organisation sont donc [GUI 12] :

- interactions locales uniquement,
- émergence d'une structure globale à partir d'informations locales,
- réactivité aux changements locaux et robustesse,
- structure d'auto-organisation non orientée source,
- passage à l'échelle.

La notion d'auto-organisation prend tout son sens dans le cadre des réseaux de capteurs. Elle offre un cadre pour faciliter la configuration des nœuds et la mise en place de protocoles de communications. Dans un réseau auto-organisé, l'intervention humaine est réduite au minimum ce qui facilite son déploiement.

Apres cette définition de l'auto-organisation et des propriétés associées, nous allons maintenant regarder quelles sont les règles permettant de concevoir un système auto-organisé.

II-3- Quelques clefs pour l'auto-organisation :

L'auto-organisation [VAL 07] doit structurer les réseaux de capteurs, pour cela nous pouvons nous intéresser à toute fonction *f* qui fait correspondre une topologie logique à la topologie physique. S'intéresser à l'auto-organisation c'est donc étudier les topologies dynamiques que l'on peut construire pour structurer le réseau. L'objectif étant bien entendu que cette structuration permette le développement plus efficace des protocoles réseaux. Les solutions d'auto-organisation des réseaux de capteurs sont basées sur les quatre paradigmes suivants :

- Emergence d'un comportement global à partir de règles locales,
- Interactions locales et coordination des nœuds,
- Minimiser les informations sur l'état du réseau,
- S'adapter dynamiquement à l'environnement.

II-3-1- Emergence d'un comportement global à partir de règles locales :

On s'intéresse à la conception d'un protocole réseau fournissant des propriétés globales comme la connexité, la robustesse, etc. L'approche centralisée va proposer l'utilisation d'un nœud dédié à ce protocole ou ce service. Dans le cas de l'auto-organisation, cette fonction doit être partagée par l'ensemble des nœuds du réseau : aucune entité ne peut établir la fonction désirée mais chaque nœud doit contribuer à l'établissement d'un comportement global. Il est donc nécessaire de concevoir des règles locales qui tendent vers ce comportement global. Les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil illustrent ce paradigme : le comportement global c'est l'acheminement depuis une source vers une destination d'un paquet de données alors que la vision locale se contente de transférer le paquet à un voisin.

II-3-2- Interactions locales et coordination des nœuds :

Le résultat de décisions locales peut conduire à des situations d'incohérence. Dans le cas de l'auto-configuration d'adresses, l'incohérence entraine des situations de conflits : deux nœuds peuvent posséder la même adresse après des décisions locales. Pour éviter ce phénomène, la première solution est d'utiliser une coordination explicite. Néanmoins, une telle solution est couteuse d'un point de vue protocolaire car nécessite la mise en place d'un mécanisme de détection d'adresses par exemple. Ce type de coordination répond bien aux systèmes centralisés.

Dans le cas d'un réseau de capteurs, l'utilisation d'une telle coordination explicite ne peut être appliquée à cause des ressources radio limitées et de la dynamique du réseau : les informations devant être mises à jour continuellement et les ressources radio étant limitées. Il faudra donc ici tolérer les conflits. Ils seront acceptables s'ils sont locaux, temporaires, facilement détectables et solubles. La notion de coordination implicite doit aussi être utilisée. Il s'agit d'exploiter toutes les informations circulant dans le voisinage local afin de détecter et de mettre à jour des incohérences. La détection de conflits permet également d'affiner, localement, la vue du réseau et donc d'améliorer les situations d'incohérences.

II-3-3- Minimiser les informations sur l'état du réseau :

Dans le cas général des réseaux, chaque nœud maintient une liste d'informations sur l'état du réseau comme : nœuds voisins, station de base, passerelles d'accès, etc. Ces informations connues par tous les nœuds doivent rester cohérentes et on doit donc utiliser un mécanisme de synchronisation.

Autant dire que plus les informations d'´etats du réseau sont importantes et moins il sera facile de recourir au concept de l'auto-organisation.

II-3-4- Adaptation dynamique à l'environnement

La dernière règle qui doit être établie dans les réseaux auto-organisés c'est la capacité à réagir aux changements de topologie du réseau et aux changements d'informations, résultant de la mobilité et/ou de la défaillance d'un nœud. Comme il n'y a pas d'entité centralisée qui peut diffuser un changement d'état, chaque nœud doit surveiller son voisinage local et réagir en conséquence.

Surveiller son voisinage local est lié au paradigme 1 tandis que réagir à de nouvelles informations est lié au paradigme 2.

[VAL 07] identifie 3 niveaux d'adaptations:

– **1er niveau** : Adaptation aux changements de topologie résultant de la mobilité ou de l'apparition ou disparition d'un nœud.

– **2ème niveau** : Adaptation des paramètres protocolaires (temporisateurs, connaissance du k voisinage, etc.) en fonction des changements d'états dans le but d'améliorer le comportement du réseau.

– **3ème niveau** : Un système auto-organisé doit être capable d'évaluer que l'environnement dans lequel il évolue ne peut pas conduire à un système stable et donc, remplacer un mécanisme par un autre.

Ces adaptations peuvent être combinées avec un contrôle adaptatif. Il faut néanmoins pondérer les mécanismes d'adaptation : un changement d'état local ne doit entraîner qu'un changement local et non pas impacter toute la topologie du réseau.

II-4- Techniques de clusterisation :

La clusterisation consiste à diviser le réseau en un ensemble de groupe de nœuds géographiquement proches [LEH 09][MOU 06]. Elle présente alors une solution intéressante pour simplifier et optimiser les fonctions et les services du réseau. En particulier, elle permet au protocole de routage de fonctionner plus efficacement en réduisant le trafic de contrôle dans le réseau et en simplifiant le processus d'aiguillage des données. Plusieurs algorithmes de clusterisation ont été proposés et évalués. Ces algorithmes ont des caractéristiques différentes et sont conçus pour satisfaire certains objectifs selon le contexte dans lequel la clusterisation est déployée (auto-organisation, routage, sécurité, conservation de l'énergie, etc.).

Dans cette section, nous présentons une étude des algorithmes de clusterisation utilisé pour l'auto-organisation des réseaux de capteurs sans fil. Cette étude distingue les principales caractéristiques des approches de clusterisation et donne une classification des algorithmes proposés. Nous détaillons également dans cette section quelques algorithmes de clusterisation.

II-5- L'avantage d'organiser en groupes un réseau.

Le concept de groupe nous permet de définir un groupe d'entités comme une seule entité virtuelle, et cela permet d'attribuer le même nom à chaque membre d'un groupe particulier, et de communiquer avec eux en utilisant la même adresse.
Dans un système distribué en général, la communication entre les nœuds, le transfert d'objets ou de processus, la prise de décisions sont des problèmes qui ne peuvent pas être résolus pour tous les nœuds. Pour remédier à ces problèmes, on a recourt à la formation de sous ensembles d'entités appelés groupes, (clusters) [BEN 07]. Ces groupes sont composés de membres. Dans chaque groupe, un des membres joue un rôle particulier, et est appelé *leader*, *manager* ou *point de contact entre niveaux*. Il est responsable de la communication entre les différents membres ou niveaux en recevant l'information et en la renvoyant aux autres membres, et en supervisant l'organisation interne du groupe.

Bien que la notion de groupes soit identique dans toutes les applications. La formation de groupes est une opération étroitement liée au types d'entités composant le système (processus ou processeurs), au support de communication (filaire ou sans fil). Chaque application donne lieu à de nouvelles notions concernant les propriétés associées aux groupes (clusters).

- ✓ ***Exemple d'une structure des clusters***

La technique de clusterisation consiste à organiser les nœuds du réseau en des groupes virtuels appelés "clusters". Les nœuds, géographiquement voisins, sont regroupés dans un même cluster selon certaines règles [GUI 12]. Dans un cluster, on retrouve généralement trois types de nœuds comme le montre la figure II-1 : "cluster-head", nœuds "passerelles" et nœuds "ordinaires "dite aussi membre. Dans chaque cluster, un nœud est élu comme chef de groupe, appelé cluster-head, qui possède des fonctions supplémentaires (routage, accès au médium, etc.). Une passerelle est un nœud non-cluster-head qui possède des liens inter-clusters et peut

donc accéder à des clusters voisins et acheminer les données entre eux, tandis qu'un nœud ordinaire est un nœud non-cluster-head qui ne possède pas des liens avec les autres clusters.

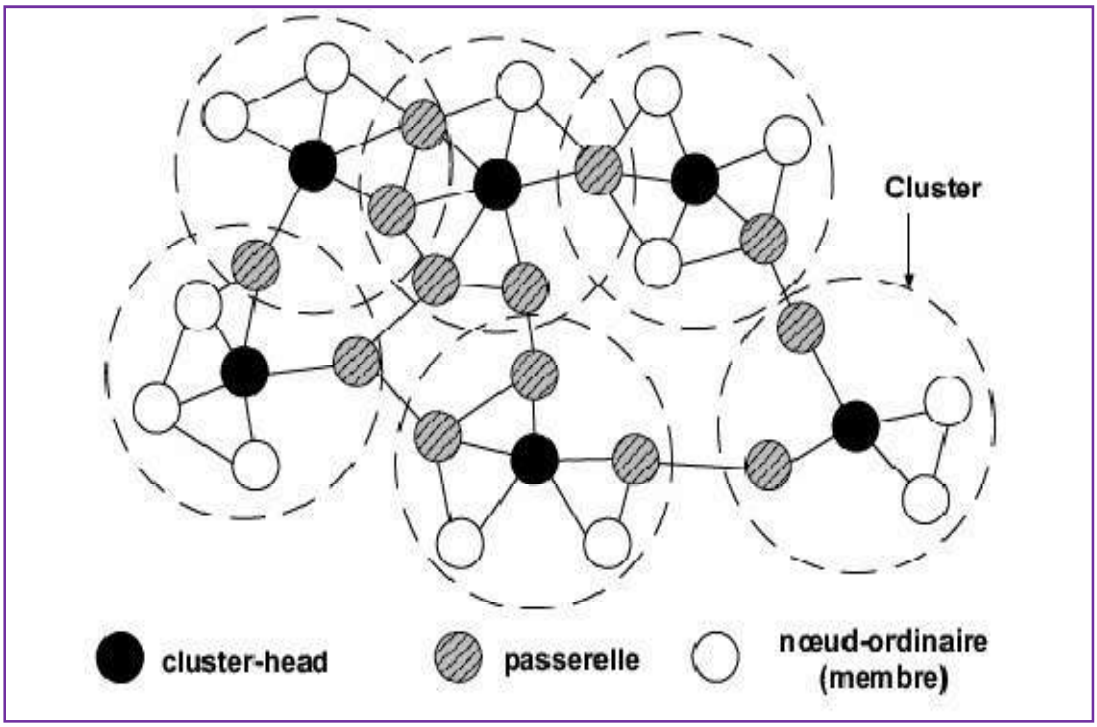


Figure II-1- Exemple d'une structure des clusters [GUI 12].

II-6- Construction d'une topologie en clusters :

De nombreuses techniques de clusterisation ont été proposées dans la littérature scientifique. Elles varient selon le mode de déploiement des nœuds (déterministe ou aléatoire), le processus d'élection des cluster-heads, la taille des clusters, le modèle de fonctionnement du réseau, etc. [GUI 12],[MOU 06]. Le principe général de construction d'une structure auto-organisée en cluster est décrit sur la Figure II-2-. Après une phase de découverte du voisinage (b), le RCSF construit sa structure en groupes de nœuds (d) ainsi qu'un chemin dominant de communication appelé dorsale (c). Notons que les étapes (c) et (d) sont chronologiquement interchangeables et même peuvent être réalisées en même temps. Classiquement un algorithme simple de clusterisation peut se décrire ainsi :

- Chaque nœud découvre son voisinage par le biais des messages "*Hellos*" qu'il diffuse à son voisinage. Cela lui permettra de calculer sa métrique (Figure II-2- b).
- Hors le cas d'une pré-désignation du cluster-head, un nœud détermine s'il est cluster-head ou pas en fonction de sa métrique et de celle de son voisinage (Figure II-2- c).
- Un nœud choisi comme cluster-head, diffuse son statut à son voisinage afin de notifier son désir de former un cluster et d'inviter ses voisins non affiliés à le rejoindre dans son cluster (Figure II-2- d).
- Tout changement de statut est notifié par une diffusion de message.

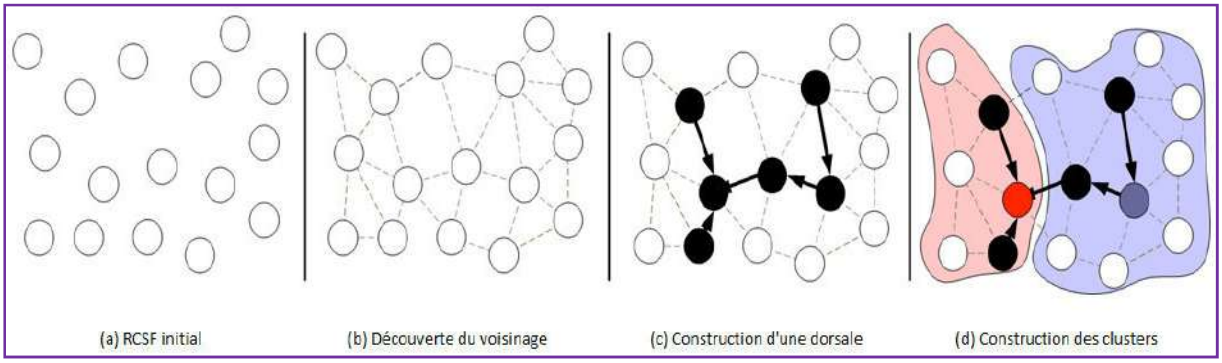


Figure II-2- Etapes de construction d'une topologie en clusters **[GUI 12]**

II-7- Classification des algorithmes de clusterisation :

La classification des approches de clusterisation existantes peut se baser sur plusieurs critères [GUI 12] [ABB 07]. La première classification évidente repose sur les critères et les métriques utilisés dans le choix du cluster-head. Dans cet axe, certains mécanismes de clusterisation ont choisi des critères simples comme l'identifiant, alors que d'autres approches ont adopté des sélections plus raffinées. Ces sélections combinent certains critères dans le but de sélectionner les nœuds les plus appropriés pour jouer le rôle de cluster-head. Une autre classification peut prendre en compte le nombre de sauts qui séparent un nœud ordinaire du cluster-head auquel il est rattaché. Dans cette classification, on retrouve deux catégories : les algorithmes à 1 saut et ceux à plusieurs sauts. La figure II-3 présente la classification des algorithmes de clusterisation.

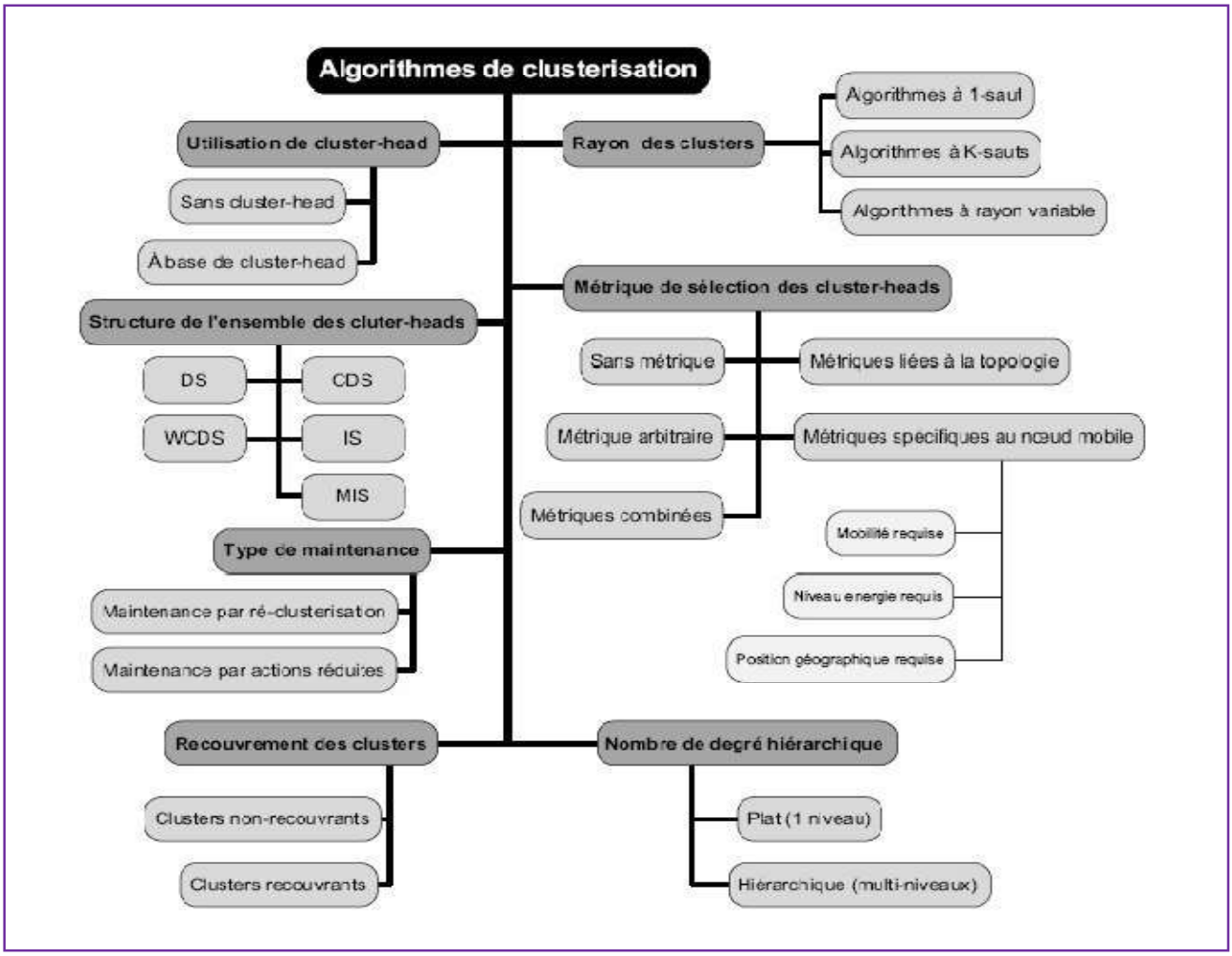


Figure II-3 - Classification des algorithmes de clusterisation [GUI 12].

II-7-1- Rayon des clusters :

Le rayon d'un cluster exprime la valeur maximale de la distance qui sépare le cluster-head à l'ensemble de ses membres. Cette distance est exprimée en nombre de sauts. Nous distinguons alors trois classes d'algorithmes : les algorithmes à 1 saut, les algorithmes à K sauts et les algorithmes à rayon variable.

II-7-2- Métrique de sélection des cluster-heads :

Plusieurs métriques ont été proposées dans la littérature pour élire l'ensemble des cluster-heads. Nous distinguons cinq classes d'algorithmes de clusterisation, selon le type des métriques employé lors de la sélection des cluster-heads. Ces cinq classes sont les suivantes :

a- Sans métrique : regroupe les algorithmes qui déclarent les cluster-heads sans avoir recours à aucune métrique de sélection.

b- Métrique arbitraire : représente une valeur choisie arbitrairement et généralement non significative. Dans cette classe, nous trouvons les algorithmes qui utilisent des valeurs aléatoires ou l'identifiant des nœuds.

c- Métriques liées à la topologie : dans cette classe nous groupons tous les algorithmes qui utilisent une métrique issue de la topologie du réseau. Parmi les métriques qui appartiennent à cette classe nous citons : le degré de connectivité, le k-degré de connectivité et la k-densité.

d- Métriques spécifiques au nœud mobile : les algorithmes de cette classe utilisent des métriques très spécifiques aux nœuds mobiles. Dans le cas général, ces algorithmes supposent connaitre certaines informations sur chaque nœud tel que sa mobilité, la puissance des signaux reçus, le niveau d'énergie ou encore sa position géographique.

Dans cette classe nous avons distingué trois sous classes qui sont :

- **Mobilité requise** : regroupe les algorithmes qui supposent que les nœuds ont une connaissance de leur mobilité.
- **Niveau énergie requis** : regroupe tous les algorithmes qui utilisent la valeur de l'énergie restante dans les batteries des nœuds comme métrique de sélection des cluster-heads.
- **Position géographique requise** : cette classe d'algorithmes suppose que chaque nœud a la capacité de déterminer sa position géographique par exemple à travers un système GPS.

- ***Métriques combinées* :** plusieurs algorithmes combinent plusieurs métriques de différents types pour élire l'ensemble de cluster-heads.

II-7-3- Structure de l'ensemble des cluster-heads :

Les cluster-heads élus forment des structures particulières parmi lesquelles nous citons [GUI 2012]:

- ***DS (Dominating Set)*** : ensemble dominant.
- ***CDS (Connected Dominating Set)*** : ensemble dominant connecté.
- ***WCDS (Weakly Connected Dominating Set)*** : ensemble dominant faiblement connecté.
- ***IS (Indépendant Set)*** : ensemble indépendant.
- ***MIS (Maximal Indépendant Set)* :** ensemble indépendant maximal.

Dans ce qui suit, nous allons donner la définition de ces différentes structures. Pour ce faire, nous avons besoin d'introduire quelques notions nécessaires.

Le réseau des nœuds est modélisé par un graphe non orienté ***G = (V, E)*** [BOU 08], où ***V*** représente l'ensemble des nœuds et l'ensemble ***E*** correspond à l'ensemble des arêtes représentant les liens existants entre les différents nœuds. La notation ***N(v)*** correspond au voisinage d'un nœud ***v*** et inclut les sommets adjacents à **v** en comptabilisant le nœud **v** aussi. Les structures présentées se basent sur la notion de dominance. Ainsi, un nœud appartenant à ces structures est appelé dominant, les autres nœuds étant des dominés.

Définition II-1 : Ensemble dominant (DS)

Un ensemble dominant (**DS : Dominating Set**) est un ensemble de nœuds tel que tout nœud du réseau est voisin d'au moins un nœud de cet ensemble. Soit ***V'*** un ensemble dominant du graphe ***G (V, E)***, alors :

$$\forall u \in V, \exists v \in V'/v \in N(u)$$

Définition II-2 : Ensemble dominant connecté (CDS)

Un ensemble dominant connecté (**CDS : Connected Dominating Set**) est un ensemble dominant où tous les nœuds dominants sont directement connectés.

Soit ***V'*** un ensemble dominant connecté du graphe ***G (V, E)*** alors :

$$\forall u \in V, \exists v \in V'/v \in N(u)$$
$$\forall (u,v) \in V'^2, \exists c = chemin_{u \to v} / \forall w \in c, w \in S$$

Définition II-3 : Ensemble dominant faiblement connecté (WDS)

Un ensemble dominant faiblement connecté (**WDS : Weakly Connected Dominating Set**) est un ensemble dominant tel que l'ensemble des dominants avec les arêtes dont une des extrémités est un dominant forme un ensemble connexe

Définition II-4 : Ensemble indépendant (IS)

Un ensemble indépendant (**IS : Independent Set**) est un ensemble de nœuds du graphe tel qu'aucune paire de nœuds de l'IS ne se trouvent voisins dans le graphe.

Soit S un sous ensemble indépendant du graphe ***G (V, E)*** alors :

$$\forall u \in S, \neg(\exists v \in S/v \in N(u))$$

La figure II-4 illustre quatre types de structures. Dans la figure II-4-**a** les nœuds noirs forment un sous ensemble dominant du réseau. La figure II-4-**b** présente un ensemble dominant connecté formé par les nœuds noirs.

Dans la figure II-4-**c** nous avons représenté un ensemble dominant faiblement connecté. Tandis que le dernier cas figure II-4-**d** de la figure montre un cas possible d'un ensemble indépendant.

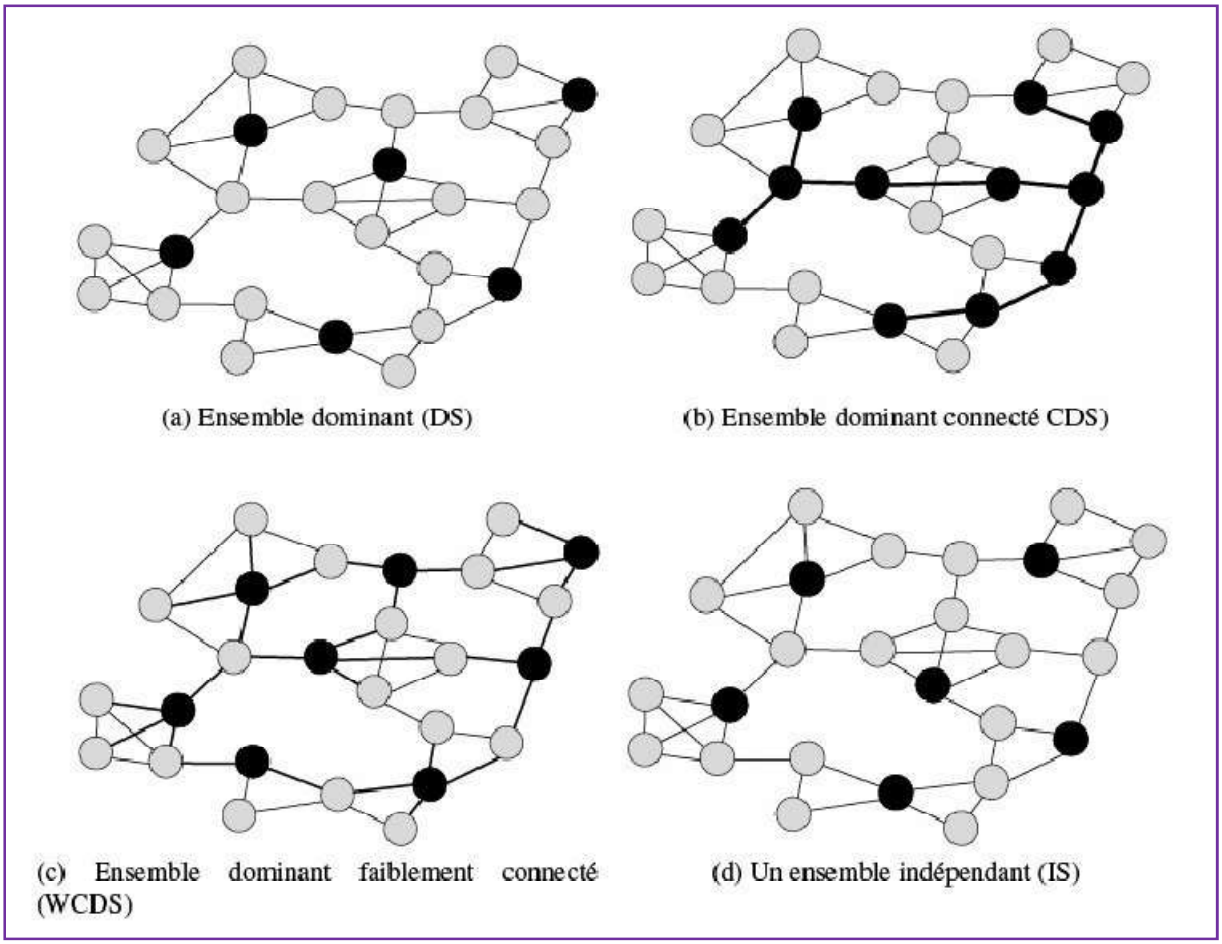


Figure II-4- Exemple de structures de l'ensemble des cluster-heads [GUI 12]

II-8- Autres critères de classification [GUI 12] [BOU 08],

II-8-1- Nombre de degré hiérarchique : Les algorithmes de base se contentaient d'élire un ensemble de cluster-heads. On parle alors d'algorithme plat à un seul niveau. D'autres algorithmes élisent des cluster-heads dans un nouveau niveau parmi l'ensemble des cluster-heads déjà sélectionnés au niveau précédent. Ils introduisent alors une hiérarchie de cluster-heads. Dans ce cas, nous parlons des algorithmes hiérarchiques multi-niveaux.

II-8-2- Type de maintenance : Dans certain nombre d'algorithmes la maintenance se fait par re-clusterisation. D'autres algorithmes proposent d'éliminer l'effet cascade introduit par la re-clusterisation. Ils proposent certaines règles et actions de maintenance qui agissent localement et limitent le diamètre des modifications dans la structure des clusters. Nous avons alors distingué deux classes selon le type de maintenance qui sont : maintenance par re-clusterisation, maintenance par actions réduites.

II-8-3- Recouvrement des clusters : Les algorithmes de clusterisation peuvent créer des clusters recouvrant où non recouvrant. Un algorithme construit des clusters recouvrant s'il existe des nœuds qui sont liés à plus qu'à cluster-head. Les clusters sont dits non recouvrant si chaque nœud appartient à un seul cluster.

II-9- Quelques approches de clusterisation :

Dans cette section, nous présentons et nous analysons les principaux algorithmes proposés de construction de clusters dans les réseaux auto-organisables [GUI 12], [LEH 09]. L'analyse détaillée de ces algorithmes nous permet de tirer profits de leurs avantages et améliorer leurs limitations. De nombreuses approches de clusterisation ont été proposées. Une grande partie des ces approches construisent des clusters à 1 saut où chaque nœud est à un saut de son cluster-head. D'autres algorithmes génèrent des clusters à k-sauts où chaque nœud est à au plus k sauts de son cluster-head. La majorité des algorithmes proposent l'utilisation d'une métrique de base qui permet d'élire un cluster-head et invoque parfois d'autres métriques pour rompre les égalités. Néanmoins, il existe des algorithmes qui n'utilisent aucune métrique particulière pour structurer le réseau en clusters. Nous avons distingué quatre types de métriques de base utilisées par les algorithmes proposés. La métrique arbitraire est une métrique qui est donnée de façon arbitraire ou aléatoire à un nœud comme l'identifiant d'un nœud. Le deuxième type de métrique concerne les métriques calculées à partir de la topologie du réseau comme la connectivité d'un nœud appelée aussi degré d'un nœud. D'autres métriques sont plutôt spécifiques au nœud mobile comme sa mobilité relative et son énergie résiduelle. Il y a des algorithmes qui combinent plusieurs métriques pour calculer un poids utilisé dans l'élection du cluster-head.

II-9-1- Les algorithmes de clusterisation à 1 saut

a- Les algorithmes à métrique arbitraire :

L'un des algorithmes de clusterisation les plus anciens est LCA (Linked Cluster Algorithme), connu sous le nom de l'algorithme du plus petit identifiant (ID) ou du plus petit ID proposé par *Baker* et *Ephremides*.[GUI 12],[LEH 09] Chaque nœud se déclare cluster-head ou non en se basant sur son identifiant et ceux de ses voisins. Un nœud peut être dans l'un de ces quatre statuts : ordinaire, cluster-head, membre, ou passerelle. Initialement, tous les nœuds ont un statut de nœud ordinaire. Les nœuds diffusent périodiquement la liste des nœuds qu'ils sont capables de détecter. La formation des clusters suit les règles suivantes :

- Si un nœud **u** possède le plus petit identifiant dans son voisinage à un saut, il se déclarera comme cluster-head et ses voisins à un saut dont les identifiants sont supérieurs à celui du cluster-head le joignent et deviennent des nœuds membres.

- Si non, il attendra que tous ses voisins à un saut déclarent leurs statuts. Ainsi si un parmi eux se déclare cluster-head alors le nœud **u** déclare à son voisinage à un saut son statut de nœud membre.

- Une fois que tous les nœuds ont soit le statut de membre ou de cluster-head, alors si un nœud **v** parmi ses voisins à un saut plus qu'un cluster-head, il se déclarera passerelle.

L'algorithme du plus petit ID considère uniquement les nœuds ayant le plus petit identifiant qui sont choisis arbitrairement sans prendre en considération d'autres caractéristiques sur les nœuds élus comme cluster-head. Comme l'identifiant du nœud ne change pas au cours du temps, les nœuds ayant un petit identifiant sont les plus probables à être choisis comme cluster-head que les nœuds ayant un grand identifiant. Ainsi, si ces cluster-heads gardent leur statut de cluster-head pour une longue durée, il en résulte qu'ils consomment rapidement leur énergie et par conséquent ils causent des goulets d'étranglement dans leurs clusters.

L'algorithme Adaptive Clustering (AC) utilise le statut de cluster-head uniquement pour la formation des clusters. Une fois les clusters formés, la notion de cluster-head disparait et les nœuds du cluster jouent le même rôle. La motivation est que les cluster-heads peuvent devenir des goulots d'étranglement et dépensent leurs ressources rapidement que les autres nœuds. Cet algorithme utilise la même métrique que l'algorithme LCA (le plus petit identifiant) pour le choix des cluster-heads. Pour construire les clusters, chaque nœud ***u*** maintient initialement son propre ID et les IDs de ses voisins à 1-saut dans un ensemble noté Ω.
L'algorithme AC est différent de l'algorithme LCA par le non recouvrement des clusters. En plus, l'algorithme se termine après que chaque nœud envoie un et un seul message de clusterisation.

En effet, chaque nœud n'est autorisé à diffuser son état (cluster-head, membre) que s'il possède le plus petit identifiant dans tous les nœuds de l'ensemble Ω.

Les règles de formation de l'algorithme AC sont les suivantes :

- Un nœud ***u*** se déclare cluster-head s'il possède l'identifiant le plus petit dans Ω. Si c'est le cas, il doit diffuser sa décision à tous ses voisins dans un message d'état (ID, C-ID).
- A la réception d'un message d'état d'un nœud ***u***, les voisins de ***u*** supprime ***u*** de leur ensemble Ω.
- Si un nœud **u** annonce qu'il est cluster-head (ID = C-ID), ses voisins s'attachent à lui si le cluster-head auquel ils sont membres a un identifiant plus grand que le ID de nœud ***u***
- Le processus continue jusqu'à ce que l'ensemble Ω de chaque nœud soit vide.

b- Les algorithmes à métrique liée à la topologie :

L'algorithme HCC [GUI 12] (Highest Connectivity Cluster) choisit le nœud ayant le plus grand nombre de voisins (plus grand degré) comme cluster-head. Initialement, tous les nœuds sont non couverts. Chaque nœud diffuse la liste des nœuds qu'il peut détecter. La phase de formation des clusters applique les règles suivantes :

- Un nœud est élu cluster-head s'il à le plus grand nombre de voisins. Dans le cas d'égalité, le nœud ayant le plus petit identifiant ID deviendra cluster-head.
- Un nœud qui n'a pas encore choisi son cluster-head demeure dans son état non couvert, si non il devient un nœud couvert.
- Un cluster-head qui a élu un autre nœud comme son cluster-head abandonne son rôle de cluster-head.
- Les nœuds appartenant à plusieurs clusters jouent le rôle de passerelle.

L'idée de HCC est que des nœuds ayant un grand degré sont de bons candidats pour être cluster-head car ils couvrent un grand nombre de nœuds et ainsi le nombre de clusters sera réduit. Dans un environnement mobile, cet algorithme produit des cluster-heads qui ne sont pas susceptibles de jouer leur rôle comme cluster-heads pour très longtemps puisque leur degré change très fréquemment contrairement à l'algorithme du plus petit ID où les nœuds de faible identifiant ont tendance à garder le statut de cluster-head plus longtemps.

Les algorithmes de clusterisation génèrent soit des clusters recouvrant ou des clusters non-recouvrant. Dans des clusters recouvrant, un nœud peut appartenir à plusieurs clusters. L'inconvénient des algorithmes à clusters recouvrant est que la ré-affiliation d'un nœud mobile d'un cluster à un autre provoque la restructuration des clusters concernés et dans certains cas la restructuration de tout le réseau. Pour remédier à ce problème, des algorithmes de clusterisation ont été proposés, permettant la création de clusters non recouvrant c'est-à-dire un nœud ne peut appartenir qu'à un seul cluster. Ceci permet de limiter l'opération de maintenance au niveau d'un seul cluster lors de la ré-affiliation d'un nœud d'un cluster à un autre.

L'algorithme 3hBAC (*3-hop Between Adjacent Cluster-heads*) proposé par Yu et Chang [GUI 12], génère des clusters non-recouvrant et impose que les cluster-heads de deux clusters adjacents se trouvent à trois sauts les uns des autres. Pour assurer cette condition, 3hBAC introduit un nouveau statut qui est nœud membre-invité dans la structure des clusters. Il définit aussi une priorité lors de la déclaration des nœuds à travers un attribut HP (*Head Priority*). Cet attribut peut avoir l'une des trois valeurs suivantes :

- "SET" : signifie que le nœud est fixé à l'état cluster-head.
- "DECLINED" : indique que le nœud ne peut pas être cluster-head. Il a un statut non cluster- head (membre, membre-invité, non-couvert).
- "UNSET" : utilisé dans le cas d'un nœud qui n'est pas encore couvert et peut devenir un cluster-head.

Avant de procéder à la formation des clusters, chaque nœud collecte les informations de son voisinage à 1-saut à travers un échange de messages HELLO. Le message HELLO contient les informations suivantes : l'identifiant du nœud, son degré, son statut ainsi que son attribut HP. Initialement tous les nœuds mobiles ont un attribut HP fixé à la valeur UNSET.

c-Les algorithmes à métrique spécifique au noeud mobile :

MOBIC [GUI 12] (Lowest Relative Mobility Clustering Algorithm) est un algorithme distribué qui applique le même algorithme que LCA et HCC mais implique une autre métrique qui est la mobilité relative des nœuds. La mobilité relative d'un nœud représente le rapport des niveaux de puissance des transmissions successives reçues par un nœud de ses voisins. Ainsi, le nœud ayant la plus faible mobilité dans son voisinage gardera un voisinage plus stable au cours du temps et sera donc un bon candidat pour être cluster-head.

d- Les algorithmes à métriques combinées :

Plutôt qu'impliquer une seule métrique pour élire les cluster-heads, une catégorie d'algorithmes de clusterisation utilisent une fonction qui combine plusieurs métriques. Cette fonction représente le poids d'un nœud. Cette catégorie d'algorithmes vise à élire un ensemble de cluster-heads qui sera le plus adapté à une topologie pour satisfaire un ou plusieurs besoins. Par exemple, dans un réseau de capteurs où l'énergie est un facteur important, le paramètre représentant l'énergie peut avoir un poids plus important dans la fonction combinée de la métrique résultante.

WCA [LEH 09] (Weighted Clustering Algorithm) est un exemple classique dans cette classe. En effet, il utilise une somme pondérée de quatre métriques dans le calcul du poids d'un nœud **u**.

Ces métriques sont la différence de degré D(u), la somme des distances avec ses voisins P(u), la mobilité relative moyenne M(u) et le temps de service en tant que cluster-head T(u) tel que :

$$Poids(u) = \alpha \times D(u) + \beta \times P(u) + \gamma \times M(u) + \delta \times T(u)$$

$$\text{Avec } \alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$$

Avec :

- La différence de degré D(u) est la différence entre le degré du nœud **u** et une valeur **M** qui représente le nombre de nœuds qu'un cluster head peut servir (la taille seuil d'un cluster).
- Les distances P(u) entre les nœuds sont calculées à l'aide d'un GPS.
- La mobilité relative M(u) est calculée de la même manière que dans MOBIC. Le nœud ayant le plus petit poids dans son voisinage devient cluster-head. Les nœuds couverts par un cluster-head ne peuvent pas participer à l'élection des cluster-heads. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que chaque nœud soit assigné à un cluster.

  Bien que WCA ait de meilleures performances que les autres algorithmes que nous avons présentés en termes du nombre de clusters produits et du nombre de

changements de cluster-heads, il a un inconvénient pour connaître le poids de tous les nœuds avant de commencer le processus de clusterisation. En conséquence, l'overhead induit par WCA est très élevé. En plus, WCA épuise rapidement les batteries des cluster-heads.

e- Les algorithmes sans métrique :

Les algorithmes classiques de clusterisation requièrent que tous les nœuds envoient des messages explicites pour former et maintenir la structure des clusters ce qui laisse la clusterisation un des principaux sources d'overhead[GUI 12].

PC (Passive Clustering) est un algorithme de clusterisation qui n'utilise pas des paquets explicites pour le contrôle de la clusterisation, d'où le nom PC qui veut dire clusterisation passive. En plus, PC n'utilise aucune métrique particulière. Dans PC, un nœud mobile peut être dans un de ces quatre états : initial, cluster-head, gateway ou nœud ordinaire. Au départ, tous les nœuds mobiles sont dans l'état initial. Seuls les nœuds mobiles dans l'état initial qui ont la possibilité d'être cluster-heads. Quand un cluster-head potentiel avec l'état "initial" veut envoyer quelque chose, il se déclare comme un cluster-head en indiquant son état dans le paquet envoyé. Les voisins peuvent s'apercevoir de la demande du cluster-head en regardant l'état du cluster dans le paquet, puis ils enregistrent l'identifiant du cluster C-ID et le temps de réception du paquet. Un nœud mobile qui reçoit une demande d'un seul cluster-head devient un nœud ordinaire, et un nœud mobile qui écoute plus qu'une demande devient un gateway. Comme PC n'envoie aucun message explicite de clusterisation pour maintenir la structure des clusters, chaque nœud est responsable d'actualiser son propre état en gardant un temporisateur. Par exemple, quand un nœud ordinaire qui ne reçoit plus de paquet de son cluster-head pour une période donnée, revient à l'état initial. PC peut former et maintenir sa structure de clusters sans échanger des paquets explicites de contrôle. Donc, il peut éliminer complètement l'overhead perçu dans la clusterisation active.

II-10- Les algorithmes de clusterisation à k saut

La communication entre le nœud Cluster-Head et les autres nœuds membres du cluster peut se faire, soit en un seul saut soit, en plusieurs sauts. Dans le cas d'une communication direct (en un saut), les paquets de données sont envoyés directement au Cluster-Head. Cela suppose que les nœuds membres sont capables d'atteindre le CH en utilisant une transmission assez puissante pour une bonne réception de données. Ce type de communication engendre une consommation importante d'énergie si la distance, entre le CH et les nœuds, est grande. Pour réduire la consommation de l'énergie, une communication en plusieurs sauts, de petites distances, est utilisée, dans ce cas chaque membre du cluster envoie ses données au plus proche membre de son cluster jusqu'à l'aboutissement au CH.

II-11- Protocole d'auto-organisation LEACH :

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchyest) [HEI 00], [HEI 02], est le premier et le plus populaire des algorithmes d'auto- organisation hérarchique avec une efficacité énergétique, qui a été proposé pour les réseaux de capteurs sans fil [KAR 04], basé sur le clustering adaptatif, qui utilise la rotation randomisée des chefs des clusters (clusters-head) pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds capteurs dans le réseau, figure II-5. LEACH formés de clusters par l'utilisation d'un algorithme hiérarchique (à deux niveaux) distribué, où les nœuds sont autonomes c.-à-d. Qu'ils prennent leurs décisions sans contrôle centralisé. Tous les traitements de données telles que la fusion et l'agrégation se déroulent localement au cluster.

Sur le registre des avantages de LEACH, nous citons une réduction d'un facteur 7 de la dissipation d'énergie comparativement avec la communication directe [BOU 10]

LEACH est fondé sur deux hypothèses de base:

- La station de base est statique et est placée a la porté de tous les nœuds du réseau.
- Tous les nœuds du réseau sont limités en énergie.

Les caractéristiques principales de l'algorithme LEACH se résument en :

- ✓ Tous les nœuds sont considérés statiques, et régis par la contrainte de consommation d'énergie.
- ✓ Contrôle localisé pour le transfert des données.
- ✓ Formation dynamique des clusters.
- ✓ La rotation aléatoire des chefs de groupes.
- ✓ L'agrégation (fusion) locale des données pour réduire le taux de communications avec la station de base.

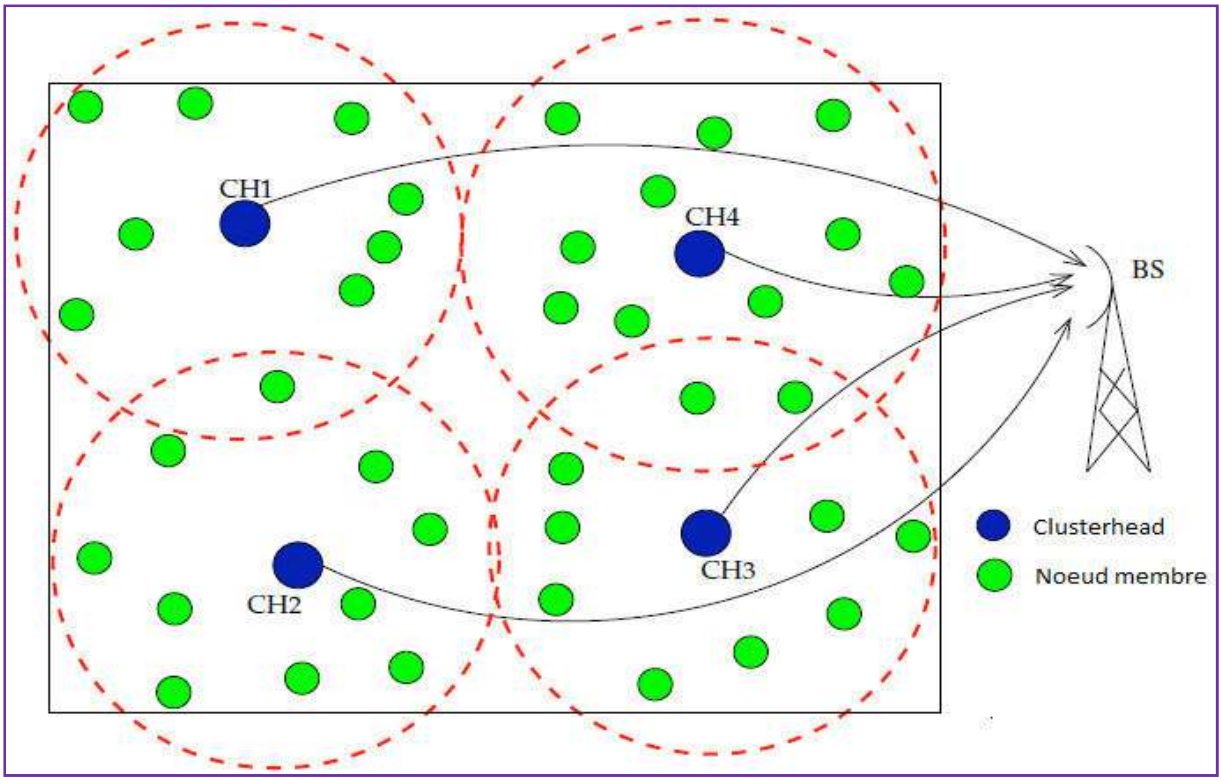


Figure II-5- Le Protocole d'auto-organisation LEACH [HEI 02]

II-11-1- Principe général de fonctionnement du protocole LEACH:

LEACH emploie la technique de clustering qui divise le réseau en deux niveaux: les Cluster-Heads (CHs) et les nœuds membres. La vie du réseau est alors segmentée en cycles (rondes ou tours) caractérisées par un choix de cluster-heads de clusters, pour chacun de ces cycles, les cluster-heads sont sélectionnés aléatoirement parmi les capteurs qui n'ont pas été auparavant élu cluster-heads

Donc le protocole se déroule en cycles. Chaque cycle se compose de deux phases: construction (*Set up phase*) et communication (*Steady-state phase*) [BOU 08].

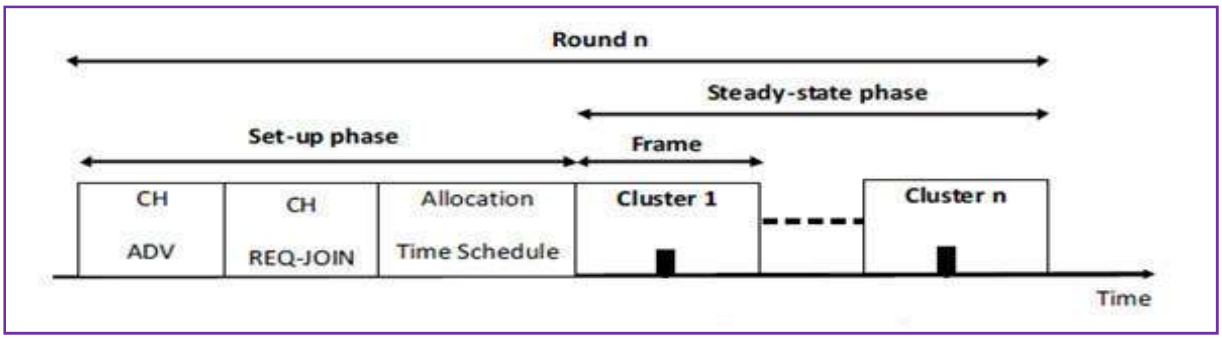


Figure II-6- Le déroulement du protocole LEACH en cycles [BEY 09]

II-11-2- La Phase de construction (Set up phase) :

a- Election des Cluster-heads :

La première phase est la construction des clusters en choisissant les chefs (CHs) et en établissant la politique d'accès au media au sein de chaque groupe. Durant cette phase, chaque nœud **n** choisit un nombre aléatoire compris entre 0 et 1. Si ce nombre est inférieur à un seuil T(n), le nœud **n** devient Cluster-heads. T(n) est défini comme suit [AOU 12] :

$$T(n)= \begin{cases} \dfrac{p}{1-p[r \bmod(1/p)]} & \text{Si } n \in G \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Tel que :

- ***p***: le pourcentage des CHs sur le réseau (donné par la courbe de la figure III-7-)
- *r :* est le numéro de la période courante.
- *G :* l'ensemble des nœuds n'ayant pas été sélectionnés cluster-head durant les *(1/p)* dernières périodes.

La figure III-2- represente le pourcentage (Probabilité) d'étre un cluster- head en fonction de nombre de nœuds d'un réseau de capteurs déployés sur une surface carrée de 100*100(m).

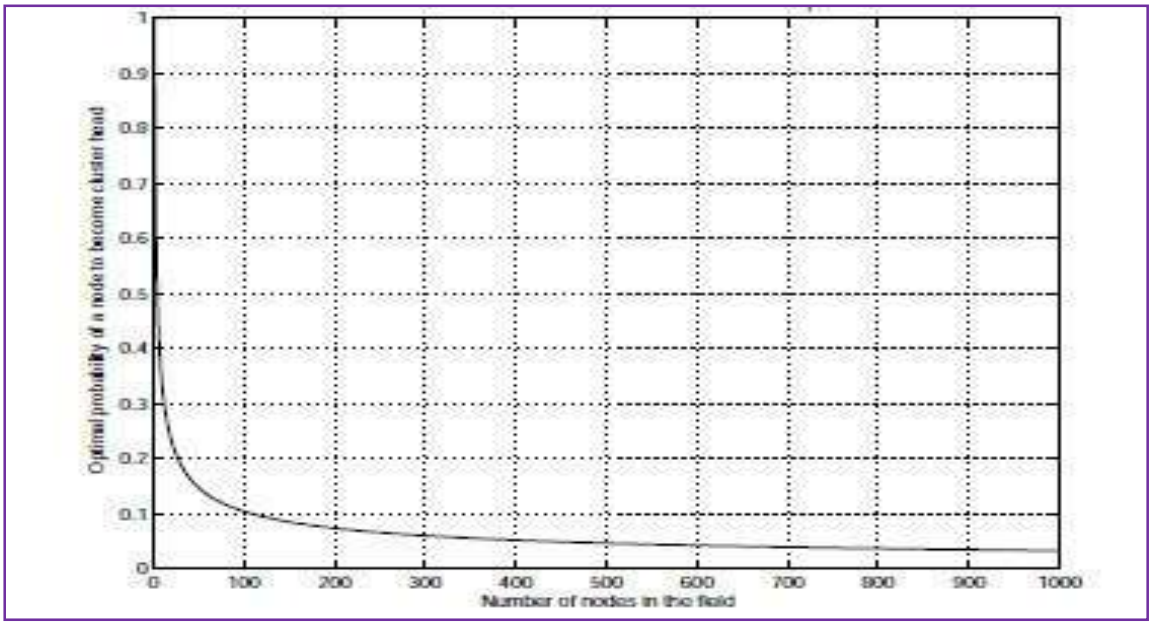


Figure II-7- Probabilité Optimale [HEN 00] [SMA 04]

b- Annoncées des Cluster-heads :

Par la suite, chaque nœud qui s'est élu cluster-head émet un message de notification (ADV Advertisment message) à tous ces voisins. Ce dernier est un petit message qui contient l'identifiant (ID) du nœud et un en-tête qui distingue ce message comme une annonce que ce message doit être diffusé pour atteindre tous les nœuds dans le réseau

c- Formation des clusters :

Les nœuds qui récoltent les messages de notification, décident leur appartenance à un cluster. La décision est basée sur l'amplitude du signal reçu, le cluster-head ayant le signal le plus fort est choisi (i.e. le plus proche). En cas d'égalité, un chef aléatoire est choisi. Chaque membre informe son chef de sa décision tout en lui envoyant une demande d'appartenance (JOIN -REQ). Ce message consisté de l'identifiant ID du nœud et l'identifiant ID cluster-head et l'entête (header).

Création de la table TDMA :

La création d'un modèle de communication intra-cluster sans collision est la dernière étape liée à la phase de clustering. Dans le bit d'éviter les collision entre les nœuds de même cluster, l'algorithme d'auto-organisation LEACH utilise la méthode de multiplexage temporel (**TDMA** : Time Division Multiplexed Access) comme méthode d'accès au médium [MOU 06]. Chaque nœud utilise la totalité de la bande passante allouée par le système de transmission durant son slots de temps. En fait, chaque CH agit comme un centre de commande local pour coordonner les transmissions de données dans son cluster. Il crée un modèle de communication en se basant sur TDMA, ensuite il transmet ce modèle aux nœuds de son cluster. Etant donné que chaque nœud connait d'avance le slot de temps qu'il va occuper, il est alors permis de passer à l'état *endormi* durant les slots inactifs. Ainsi, la perte d'énergie due aux états de sur-écoute (overhearing) et d'écoute- passive (idle) est évitée.

Le fonctionnement du protocole est basé sur des cycles ou Ronds (*Round*) : chaque cycle est constitué de deux phases : la phase *Setup* et la phase *Steady-state*. Pendant la phase *Setup* les nœuds exécutent l'algorithme d'élection de Cluster-heads et les clusters sont formés. La phase *Steady-state* est la phase du fonctionnement ordinaire du réseau, elle est subdivisée en trames (frame). La trame, à son tour, est subdivisée en *TimeSlots*. La longueur de la trame est variable d'un cluster à l'autre selon le nombre des nœuds du cluster

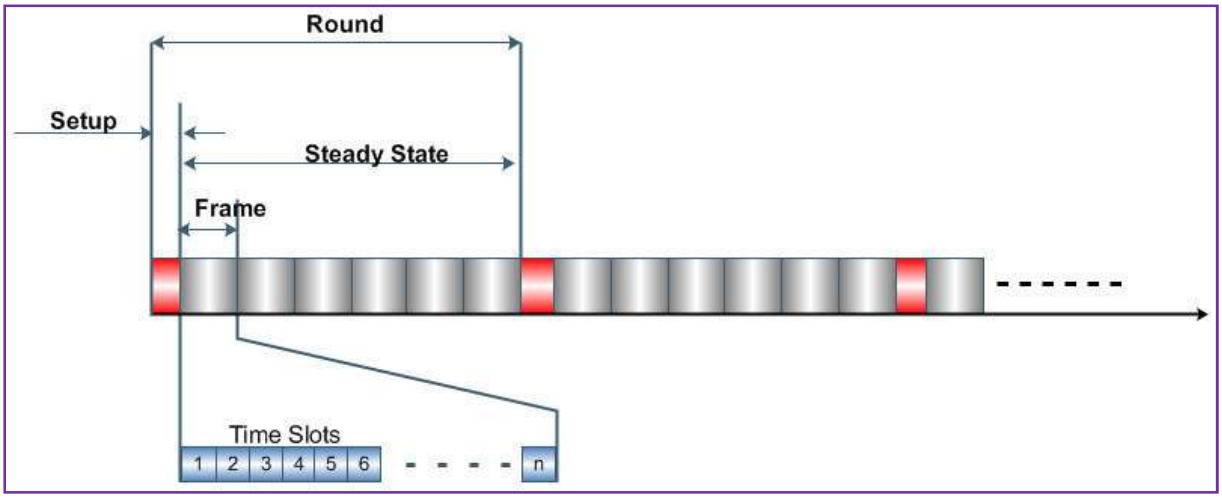
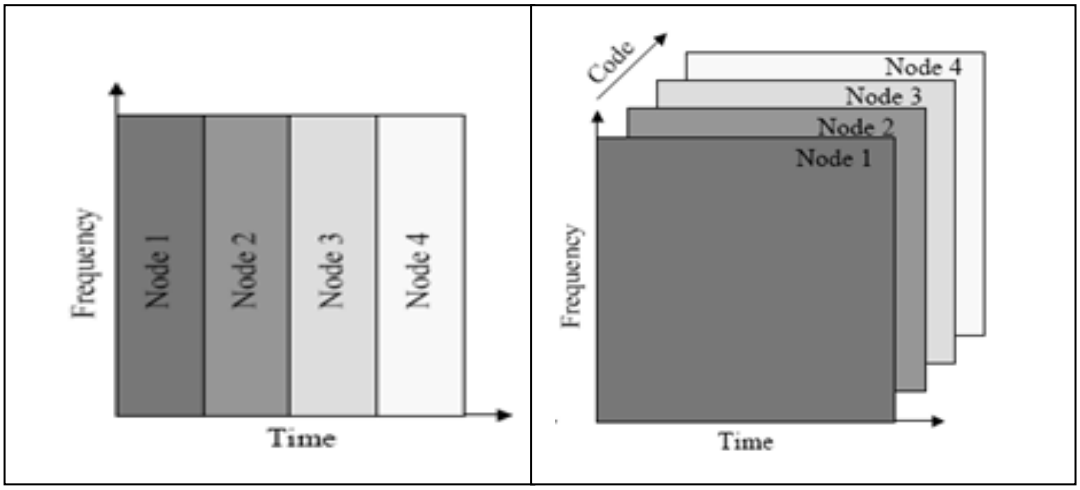


Figure II-8- Répartition du temps et différentes phases dans le cycle de LEACH

La figure III-8- illustre la répartition du temps effectuée par LEACH : le Round "*cycle*", les phases *Setup* et *Steady-State*, la répartition en trames et en *Time Slots*.

Encore Chaque CH choisit aléatoirement un code dans une liste de codes de propagation **CDMA** (Code Division Multiple Access), il transmet aux nœuds appartenant à son cluster afin de l'utiliser pour leurs transmissions, Ceci afin de minimiser les interférences entre les messages des CHs les plus proches.



TDMA **CDMA**

Figure II-9_ Méthodes D'accès Au Médium

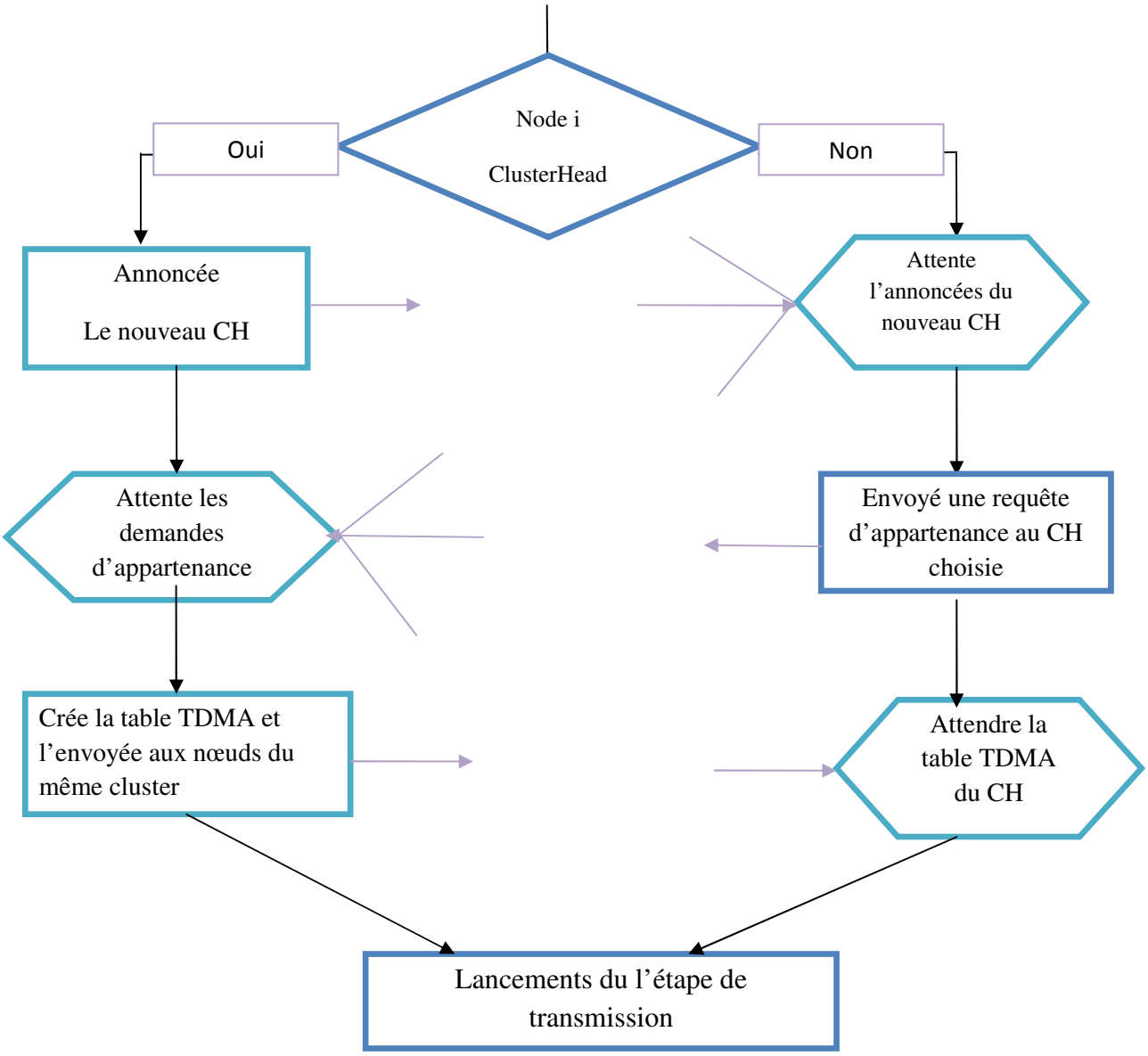


Figure II-10- Opérations de la Phase de construction (Set up) de LEACH [BOU 08]

II-11- 3- Phase de communication :

Pendant cette phase, les nœuds capteurs peuvent commencer à envoyer leurs données captées au cluster-head pendant leurs propres slots. Cela leur permet d'éteindre leur interface de communication en dehors de leurs slots réservés, afin d'économiser leur énergie. Le cluster-head agrège les données reçues avant de les transmettre au collecteur (Station de base). Cette communication, entre un cluster-head et le collecteur, se fait d'une manière directe, et toutes les communications membre-chef se font avec le code CDMA. Après une certaine période de temps, un nouveau round est initié, et de nouveaux clusters sont établis.

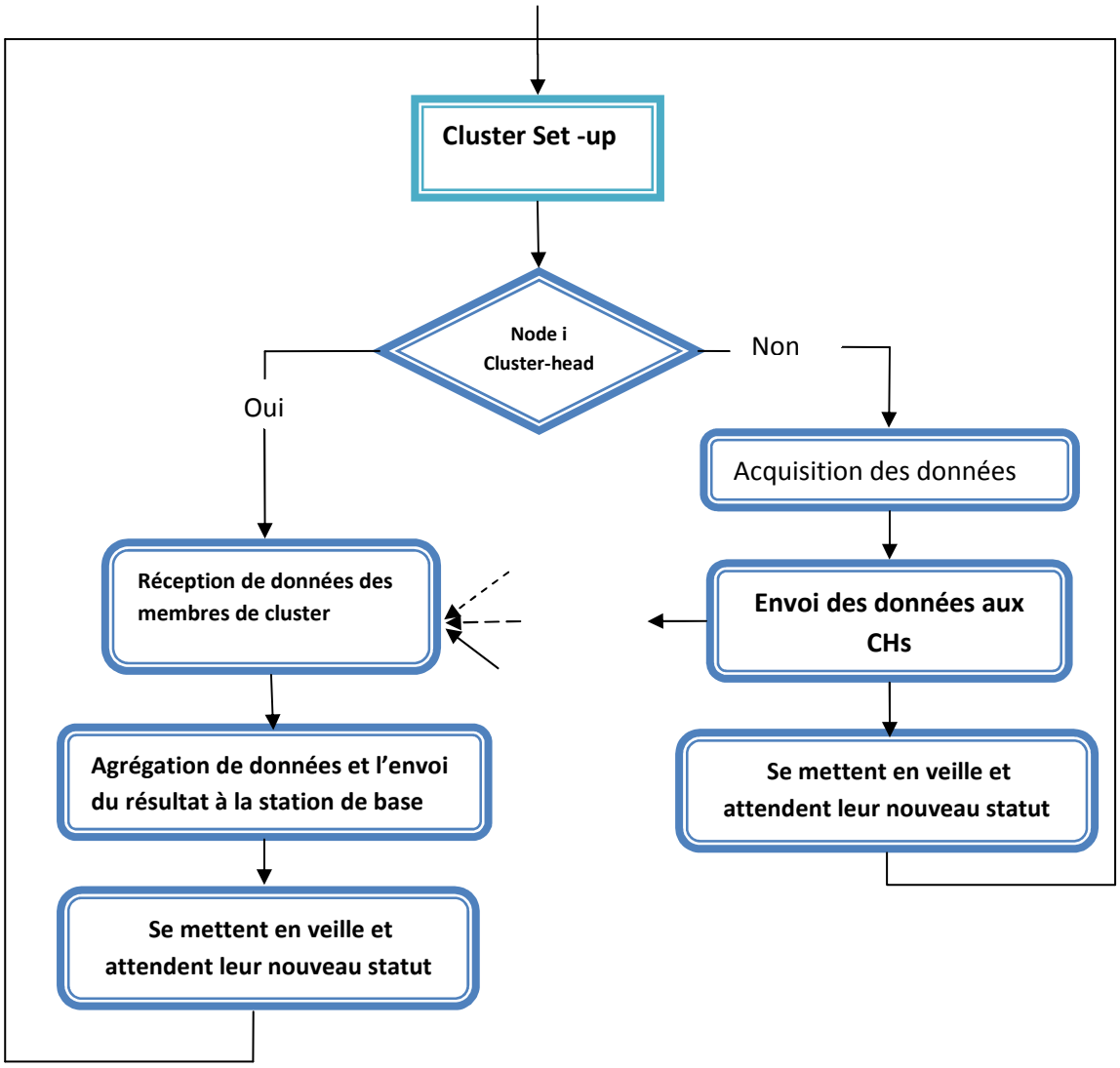


Figure II-11-Opérations de la phase de communication (Steady-state) de LEACH [BOU 08]

II-12- Le Protocole SEP (Stable Election Protocol) :

Dans [SMB 04] les auteurs proposent l'algorithme SEP comme un nouveau protocole d'auto-organisation efficace en consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs hétérogène (composé de nœuds normaux et de nœuds avancés).

SEP est un algorithme basé sur les groupes (cluster) [ADE 09]. Ce protocole est similaire à LEACH, dans le quel les cluster-heads de clusters élus collectent les données à partir de tous les nœuds capteurs appartenant à leur groupe, agrègent les données rassemblées par des procédures de fusion, et transmettent ces données directement à la station de base.

Les cluster-heads de groupes élus demeurent ainsi pour une période de temps appelée tour « round ». Au début de chaque tour, chaque nœud détermine la possibilité d'être un cluster-herd (chef) de cluster pendant la période en cour, s'il décide de l'être, il annonce sa décision à tous ses nœuds voisins. Les autres nœuds qui décident de ne pas être un cluster-head de cluster, se joignent à l'un des cluster-head élus après avoir reçu leur décision.
Les cluster-heads de grappes (clusters) sont sélectionnés périodiquement en se basant sur l'énergie résiduelle initiale du nœud, et comme le réseau hétérogène est composé de deux types de nœuds : **m*n** nœuds avancés à énergie initiale est égale à $\mathbf{E_0 (1+a),}$
(1-m)*n nœuds normaux à énergie initiale est égale à $\mathbf{E_0,}$

SEP utilise la même stratégie que LEACH pour l'organisation de réseau, mais adopte une approche différente pour l'élection des cluster-heads. Durant cette étape [QIN 06], SEP utilise deux pourcentages des cluster-heads sur le réseau [SMA 04], [REH 13]:

Un pourcentage pour les nœuds avancés $\boldsymbol{P_{ADV}}$
Un pourcentage pour les nœuds normaux $\boldsymbol{P_{NOR},}$

Avec : $\mathbf{P_{NOR} = P_{Opt} / (1+a*m),}$

$\mathbf{P_{ADV} = P_{Opt} *(1+a) / (1+a*m),}$

La probabilité optimale $\mathbf{P_{Opt}}$ donnée par la courbe de la figure II-7-

Donc l'objectif visé par le protocole SEP est : Les nœuds avec une grande énergie résiduelle à plus de chance de s'élire cluster-head $\mathbf{(P_{NOR} < P_{ADV}).}$

Afin d'améliorer les performances de protocole SEP les auteurs de [FAI 12] proposent une variante de protocole SEP appelée Z-SEP.

II-13- Protocole Z-SEP (Zonal-Stable Election Protocole) :

Il consiste à partitionner le réseau hétérogène en trois zones sur la base des niveaux d'énergie et coordonnée Y de domaine de réseau voir l'exemple de la figure II-11.

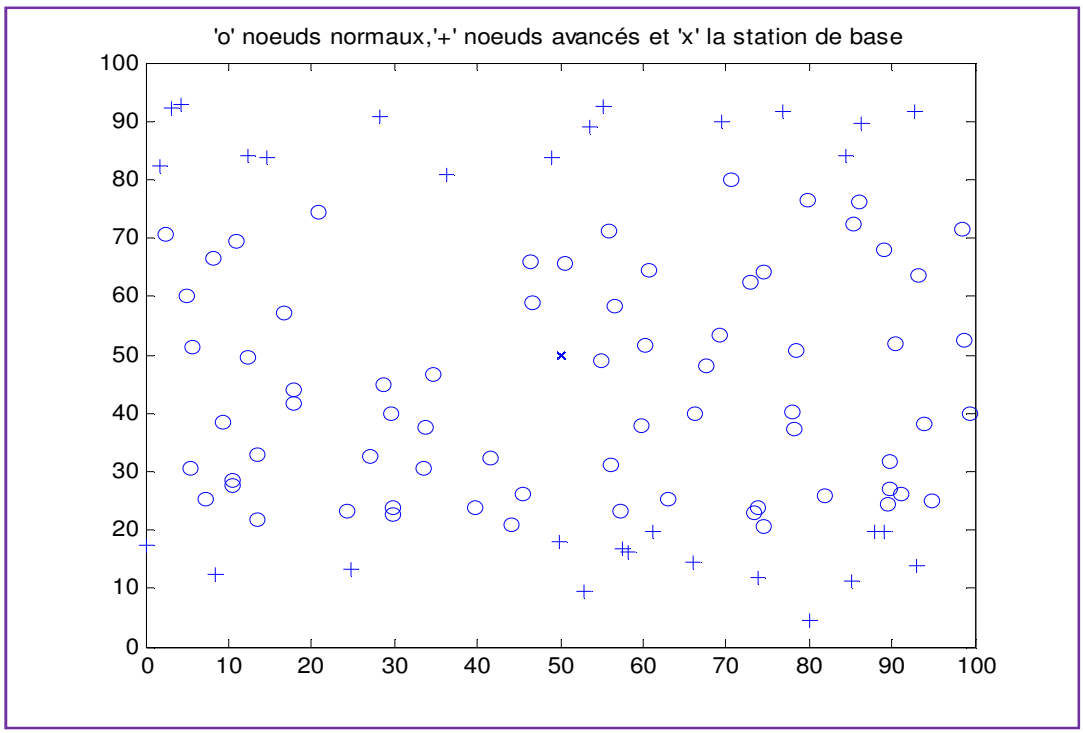


Figure II-12- Répartition de nœuds du réseau avec Z-SEP (Y_d=20, n=100 et m=0.3)

- Les nœuds normaux sont déployés aléatoirement dans la zone Z0 comprise entre 20<Y<=80.
- La moitié des nœuds avancés sont déployés de manière aléatoire dans la zone Z1, se trouvant entre 0<Y<=20.
- La moitié des nœuds avancés sont déployés de manière aléatoire dans la zone Z2, située entre 80<Y<=100.

La raison derrière ce type de déploiement des nœuds est que les nœuds avancés sont déployés dans les coins ou bien les endroits les plus éloignés dans le réseau afin d'utiliser leur énergie supplémentaire pour la communication avec la station de base.

Le protocole Z-SEP [FAI 12] utilise deux techniques pour transmettre des données à la station de base :

- Communication directe : les nœuds dans la zone Z0 envoient leurs données directement à la station de base.
- Transmission par les nœuds CHs : les nœuds dans les zones Z1 et Z2 transmettent leurs données à la station de base à travers l'algorithme de clustering utilisé par le protocole SEP.

II-14-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la technique de clusterisation qui est largement utilisée dans les protocoles d'auto-organisation des réseaux de capteurs sans fil. Cette technique bien qu'elle soit attrayante pour remédier aux problèmes de passage à l'échelle, elle introduit des coûts supplémentaires comparés à un réseau plat. Plusieurs variétés d'algorithmes de clusterisation ont été proposées dans la littérature. Nous avons présenté une classification de ces algorithmes qui met en évidence les principales caractéristiques des approches proposées. Nous avons également cerné les métriques les plus pertinentes pour évaluer les performances des algorithmes de clusterisation. Dans la dernière partie du chapitre, nous avons présenté le fonctionnement de certains algorithmes de clusterisation proposés dans la littérature.

L'inconvénient majeur de la plupart des approches est de ne pas garder la structure des clusters stable dans un environnement dense, mobile et à large échelle. Fournir un mécanisme de clusterisation stable est important pour le bon fonctionnement des protocoles d'auto-organisation des réseaux de capteurs sans fil

La stabilité de la structure des clusters permet de garantir la stabilité des routes et donc réduire le coût de leur maintenance et améliorer les performances du réseau.

Dans le chapitre suivant, nous évaluons les performances du protocole d'auto-organisation LEACH amélioré en termes : durée de stabilité du réseau, durée de vie du réseau et nombre de paquets envoyés à la station de base durant la durée de vie du réseau.

Chapitre III

Développement & Evaluation

Du Protocole D'auto-organisation

LEACH

CHAPITRE III

EVALUATION DES PROTOCOLES D'AUTO-ORGANISATION

III-1-Introduction :

Les réseaux de capteurs sans fil sont différents des autres réseaux sans fil car ils ont en général les spécificités suivantes : une grande densité, faible débit, faible capacité d'énergie et un environnement inaccessible. Ces deux dernières spécificités ont fait de l'énergie une contrainte très importante puisque les batteries des capteurs ne sont pas généralement rechargeables. Pour prolonger la durée de vie d'un réseau de capteur sans fil tout en assurant les trois tâches principales d'un nœud capteur : capture, traitement et l'envoi des données, il faut bien conserver l'énergie des nœuds capteurs. Parmi ces trois tâches, l'envoi des données ou la communication est la tâche qui consomme la plus grande partie de l'énergie. Ceci a motivé des travaux de recherche à se focaliser sur l'auto-organisation des RCSF.

Dans ce cadre, nous nous intéressons à étudié un algorithme d'auto-organisation basé sur l'approche de clusterisation, dans lequel la contrainte énergie est utilisée pour formé les clusters et l'élection des cluster-heads se fait périodiquement dans le but de distribuer équitablement la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs et donc obtenir une longue durée de vie du réseau.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de simulation des protocoles d'auto-organisation LEACH, SEP, et Z-SEP, puis proposer et évoluer une approche améliorée du protocole d'auto-organisation LEACH **(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy).**

III-2- L'algorithme d'auto-organisation LEACH :

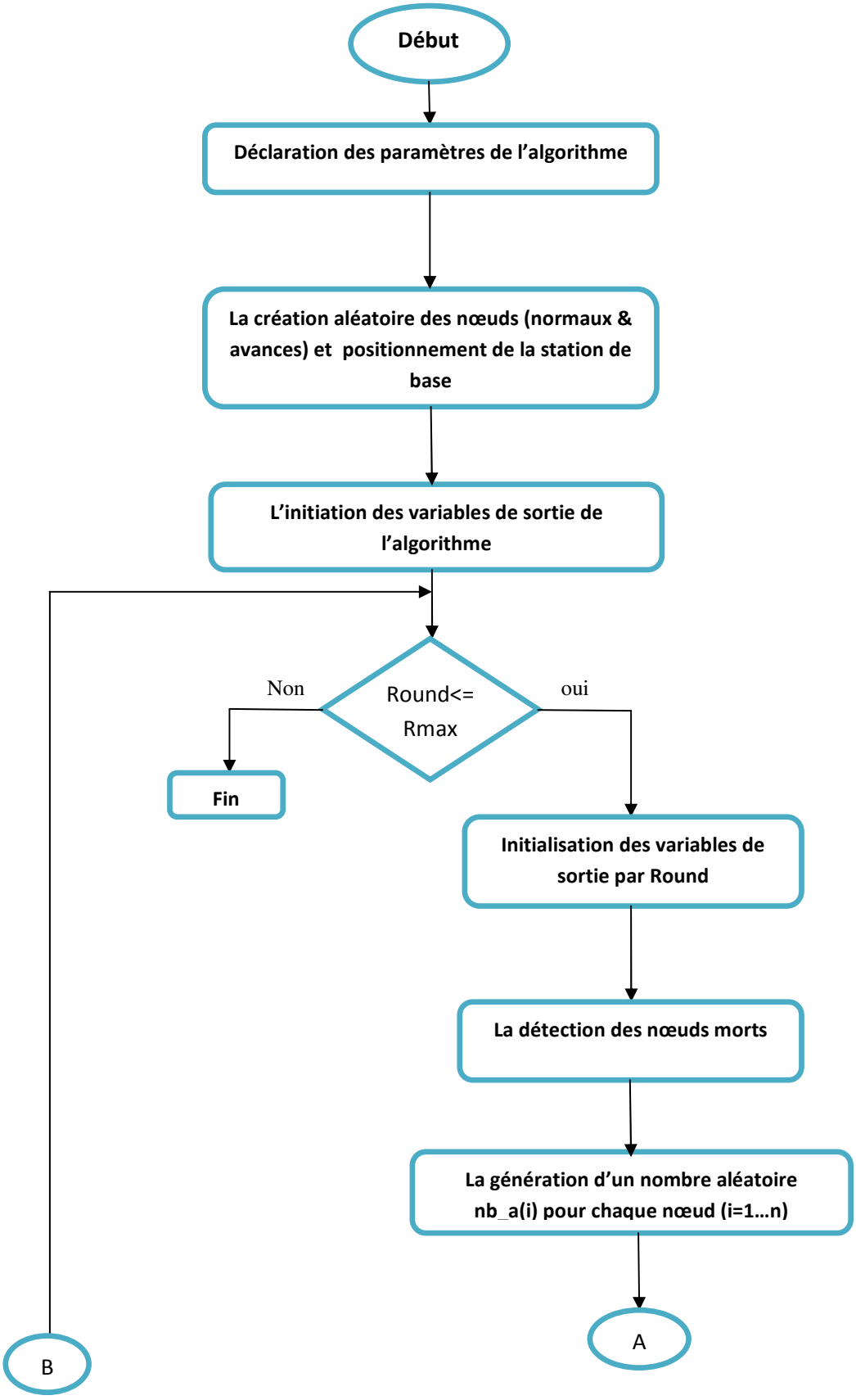
P*aramètres d'algorithme:*

- *Zone de captage* : La surface de déploiement des nœuds capteurs.
- Nombre total de nœuds (nœuds normaux et nœuds avances).
- L'énergie initiale des nœuds, et position de la station de base.
- Les facteurs d'amplification du signal pour l'émission.
- Eelec: La consommation d'énergie par le circuit électrique / bit.
- EDA : C'est l'énergie consommée pour l'agrégation de données / bit.
- Probabilité d'élection des CHs.

Les Variables de sortie de l'algorithme :

- La période de stabilité du réseau.
- Nombre de nœuds morts par tour, et par types de nœuds.
- Nombre de messages réceptionnés par la station de base par tour.
- Nombre de messages réceptionnés par les CHs par tour.

III-3- L'organigramme De Protocole LEACH :



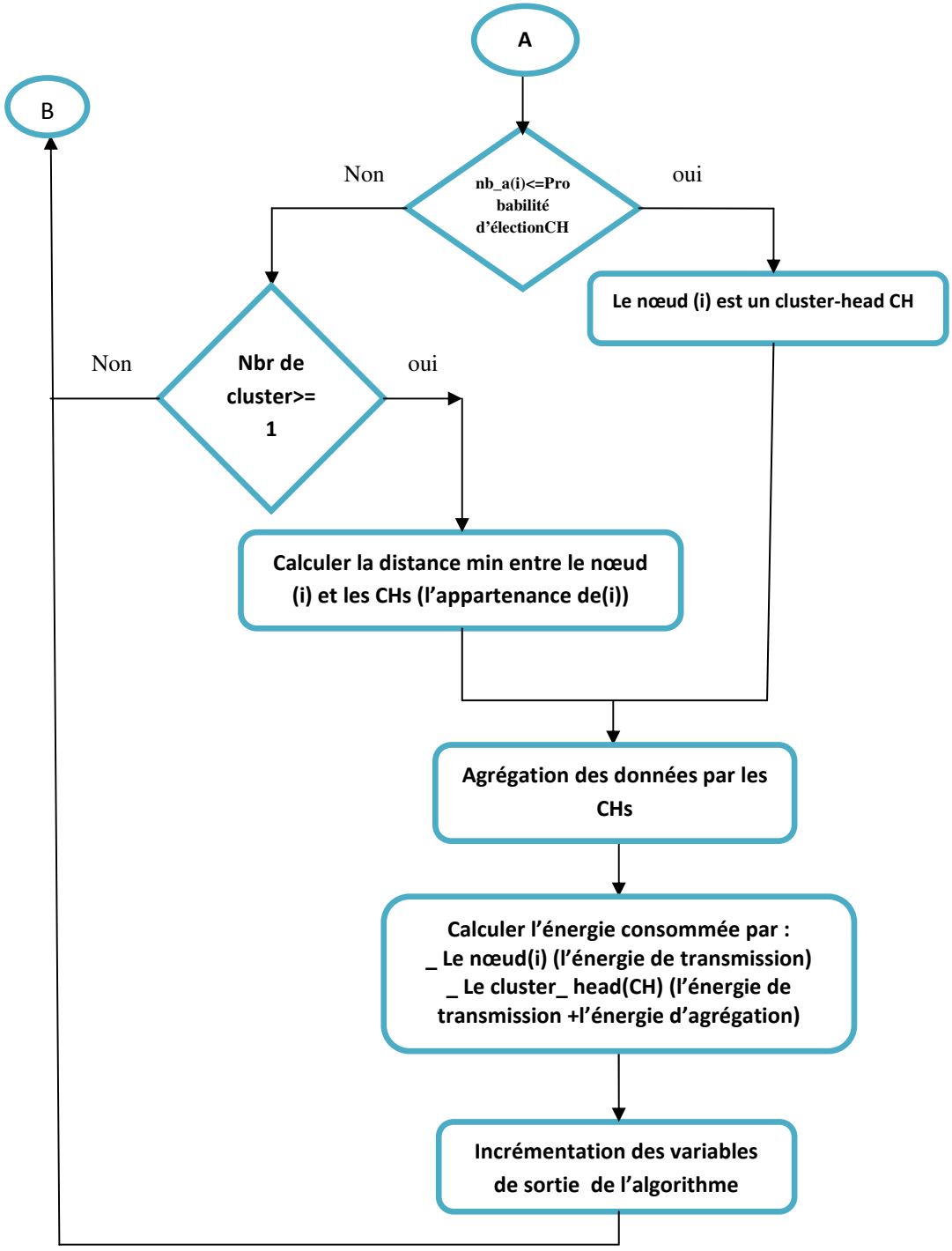


Figure III-1- L'organigramme De Protocole LEACH

III-4- Simulation De Protocole LEACH :

III-4-1- La simulation :

Selon Shannon [SHA 89], La simulation est *« le processus de modélisation d'un système réel sur lequel on opère des expérimentations afin de comprendre son comportement et/ou d'évaluer plusieurs stratégies opérationnelles sur ce système »*. Cela veut dire qu'une

simulation est une représentation fidele d'un système réel avec des hypothèses initiales qui permettent de réduire la complexité de la modélisation et qui la rendent faisable techniquement.

L'une des méthodes d'évaluation des performances d'un système est la simulation par la méthode analytique. Dans ce qui suit, nous présentons puis analysons les résultats des simulations obtenus par ***MATLAB***.

III-4-2- La modélisation du système :

L'évaluation et le développement de protocole d'auto-organisation LEACH est réalisée sur un réseau de capteurs sans fil de **n** nœuds déployés aléatoirement sur une zone carrée de longueur **L** (surface de déploiement : **L*L**). Ce réseau est caractérisé par :

- **Homogène :** un réseau homogène est constitué par un seul type de nœuds (nœuds normaux)

- **Hétérogène:** un réseau hétérogène est constitué par deux types de nœuds à des caractéristiques techniques semblables [SMA 04].
  - Le 1er type : constitué par **m*n** nœuds appelés nœuds avancés (Advanced ondes).
  - Le 2eme type : constitué par **(1-m)*n** nœuds appelés nœuds normaux.

Avec **n** : Le nombre total des nœuds du réseau ;
m : La fraction (Pourcentage) des nœuds avancés

L'énergie initiale:

- L'énergie initiale d'un nœud normal est égale à $\mathbf{E_0}$
- L'énergie initiale d'un nœud avancé est égale à $\mathbf{E_0\ (1+a)}$

Avec **a** : Le facteur supplémentaire d'énergie entre un nœud normal et nœud avancé

- **Non uniforme:** Les nœuds du réseau sont déployés d'une manière aléatoire sur la zone de captage;

- **Statique:** les nœuds et la station de base sont immobiles durant toutes les simulations.

Et avec les hypothèses de départ suivantes :

- ✓ La station de base couvre toute la zone de captage.
- ✓ La distance, séparant deux nœuds, peut être calculée selon la formule qui donne la distance entre deux points dans un espace euclidien ou bien selon la force du signal

reçu(ou **RSSI**). En **annexe** vous trouverez une explication détaillée sur cette métrique d'estimation.

- ✓ Les nœuds du réseau ne disposent d'aucun dispositif de géo-localisation.
- ✓ Tous les nœuds sont considérés comme source de données avec un prélèvement et une dissémination périodique.

III-4-3- Le modèle énergétique :

Un capteur utilise son énergie pour réaliser trois actions principales : l'acquisition, la communication et le traitement des données [ADE 09] [SMA 04].

- Acquisition : L'énergie consommée pour effectuer l'acquisition n'est pas très importante. Néanmoins, elle varie en fonction du phénomène et du type de surveillance effectuée.
- Communication : Les communications consomment beaucoup plus d'énergie que les autres taches. Elles couvrent les communications en émission et en réception. La figure III-2- présente le modèle d'antenne et les règles de consommation d'énergie associées utilisé par le protocole LEACH [LEH 09].

Pour transmettre un message de *k bits* sur une distance de *d mètres*, l'émetteur consomme :

$$E_{TX}(k,d) = \begin{cases} E_{elec} * k + \varepsilon_{fs} * k * d^2 & \text{si } d <= d_0 \\ E_{elec} * k + \varepsilon_{tr} * k * d^4 & \text{si non} \end{cases}$$

Pour recevoir un message de k bits, le récepteur consomme :

- L'énergie consommée pour recevoir un message de taille *k (bits)* est :

$$E_{RX}(k) = E_{elec} * k$$

Avec :

E_{elec} : C'est la consommation d'énergie du circuit de transmission et de réception d'un bit.
k : taille d'un message.
d : Distance entre l'émetteur et le récepteur.
ε_{fs} : est le facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission inferieur ou égale à la distance seuil d_0.

ε_{tr} : est le facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission supérieure ou égale à la distance seuil $\boldsymbol{d_0}=\sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{tr}}}$, (Cette distance seuil d_0 est nommée encore dans quelques références $d_{\text{cross over}}$ (Cross over distance))

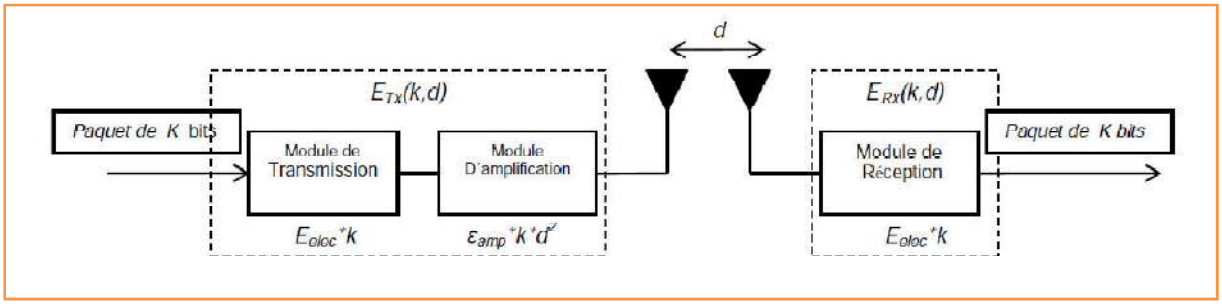


Figure III-2- Modèle de consommation d'énergie pour la communication [ADE 09].

- Traitement des données : L'énergie consommée pour les opérations de calculs est beaucoup plus faible que l'énergie de communication. Un exemple est cité dans [POT 00], L'énergie nécessaire pour transmettre 1Kb sur une distance de 100 mètre est approximativement équivalente à l'énergie nécessaire pour exécuter 3 millions d'instruction avec une vitesse de 100 millions d'instruction par seconde. Ce niveau peut être dépassé en fonction des circuits installés dans les nœuds.

III-4-4- Métriques utilisées :

Pour analyser les performances de protocole d'auto-organisation LEACH, nous avons opté pour les métriques suivantes :

- ✓ ***Période de stabilité*** [SMA 04] : C'est la durée jusqu'à la mort du premier nœud du réseau.

- ✓ ***La durée de vie de réseau [LEH 09]*** **:** Le problème de conservation d'énergie et de prolongement de la durée de vie dans les réseaux de capteurs tout en assurant une couverture entière de la zone d'intérêt est principalement contraint au taux de capteurs vivants dans le réseau.

  Dans la plupart des applications, la durée de vie du réseau suit la métrique LND (Last Node Dies) c. à. d. Le temps qui s'écoule jusqu'à la mort du dernier nœud du réseau. Cependant, cette métrique ne devrait pas être utilisée dans certaines applications critiques telles que les applications de détection et de surveillance d'intrusion, dans lesquelles le taux de couverture de la zone d'intérêt devrait être assez élevé. Ainsi, pour que le réseau accomplisse ses missions pour lesquelles il a été déployé avec succès, nous exigeons souvent que le taux de capteurs vivants soit supérieur à une certaine valeur seuil noté α -coverage. α -coverage représente le taux nécessaire de capteurs vivants pour garantir la couverture totale de la zone d'intérêt.

Nous considérons que lorsque le taux de capteurs vivants descend sous le seuil α - coverage, le réseau deviendra dysfonctionnel.

- ✓ ***La quantité d'information*** : C'est la quantité des données (messages) reçus par la station de base.

Le tableau suivant résume l'ensemble des paramètres utilisés pour les simulations :

Paramètres	Valeur	Variation
Le nombre des nœuds Total (**n**)	100	50, 100, 200, 400
Surface de Déploiement (L*L)	100*100	
L'énergie initiale des capteurs $\mathbf{E_0}$	0.5J	
Fraction des nœuds avancé **m**	0.1	0, 0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4
Facteur supplémentaire d'énergie **a**	1	0, 1, 2, 2.5, 3, 3.5, 4
La position de la station de base	X=50, Y=50	
La taille des messages de donnée	4000 bits	
Le cout de transmission d'un paquet	50 nJ/bit	
Le cout de réception d'un paquet	50 nJ/bit	
Le cout d'agrégation d'un paquet	5 nJ/bit	
La probabilité d'être CH(**P**)	0.1	0.15, 0.1, 0.075, 0.05
Le nombre des rounds 'tours' (**r** max)	8500	

Tableau III-1- Les Paramètres de Simulation

III-5-Résultats des simulations:

Dans ce qui suit, nous présentons puis analysons les résultats des simulations obtenus.

III-5-1- La Période de stabilité :

Nous avons effectué plusieurs simulations en variant les paramètres caractéristiques d'hétérogénéité de réseau **m** et **a** :

- ***<u>Un réseau Homogène</u>*** (m=a=0) : Tous les nœuds du réseau sont semblable en ce qui concerne les caractéristiques techniques et l'énergie initiale ($\mathbf{E_0}$) voir la figure III-3-

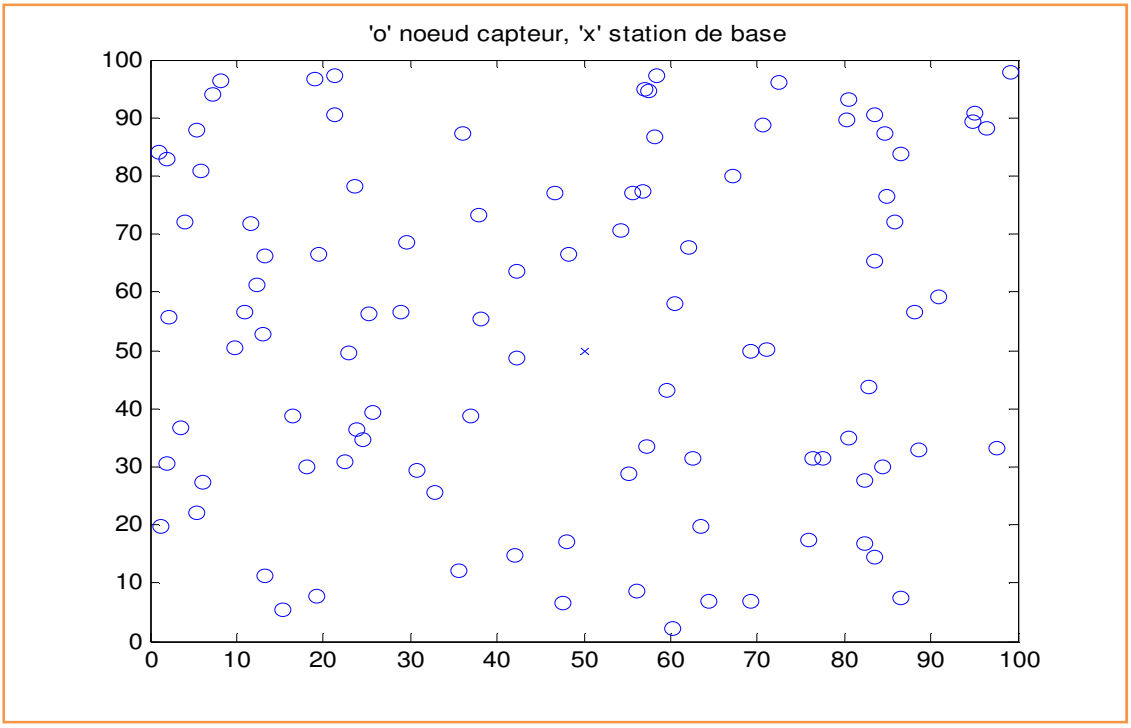


Figure III-3- Réseau Homogène aléatoirement déployé (n=100)

- ***Un réseau Hétérogène :***

*Par exemple pour m=0.3 et a=1 le réseau à un nombre des nœuds avancés est égal à 30% des nœuds total du réseau. Ces nœuds ont une énergie initiale doublée ($E_i = E_0 (1+a) = 2E_0$) voir la figure III-4-

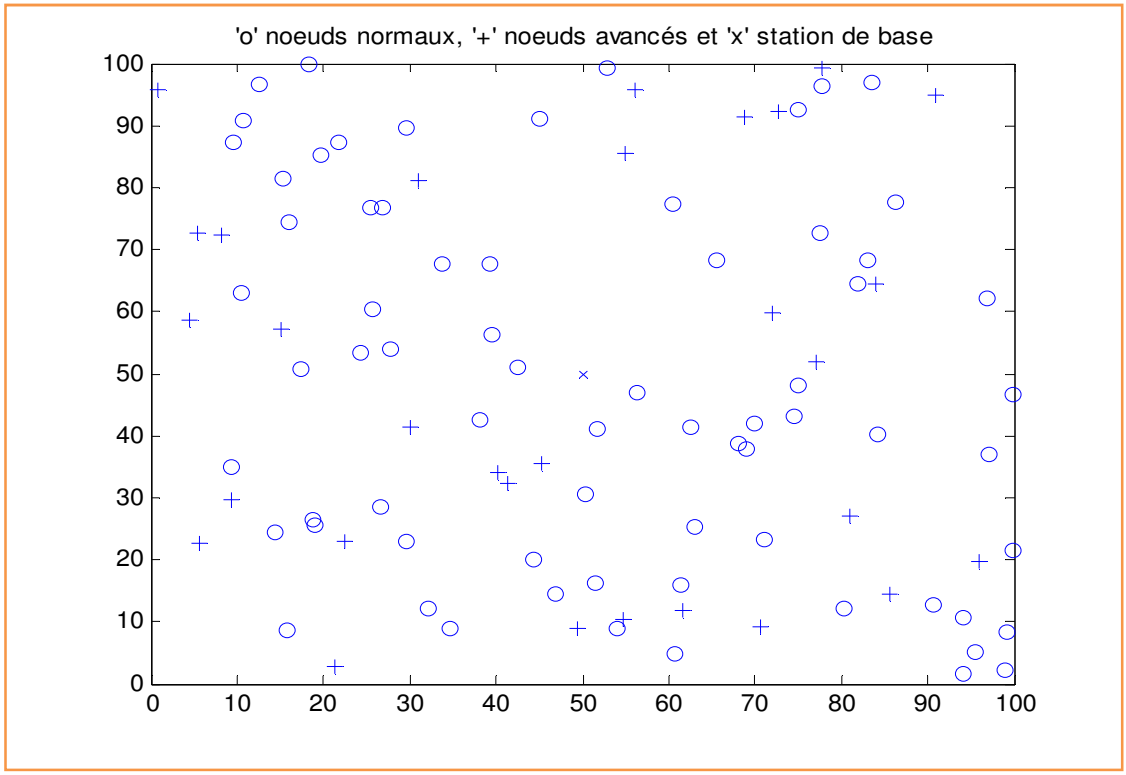


Figure III-4- Réseau Hétérogène aléatoirement déployé avec m=0.3 et n=100

Les résultats obtenus en termes de périodes de stabilité sont représentés par la figure III-5- suivante :

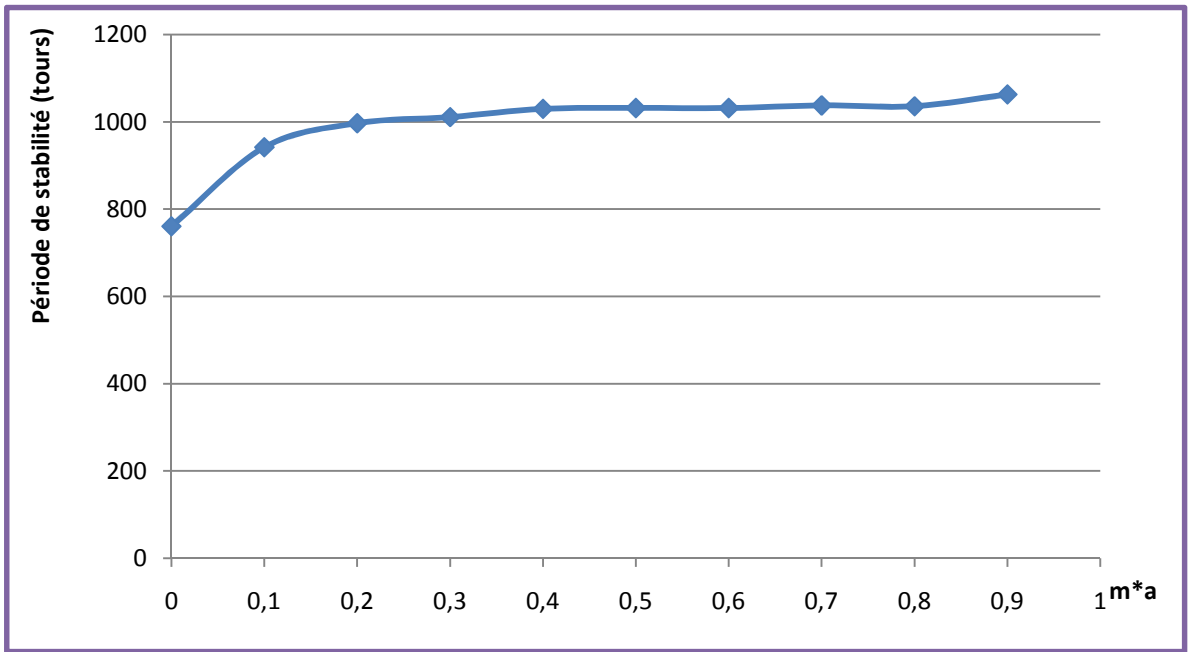


Figure III-5- La période de stabilité du réseau en fonction de degré d'hétérogénéité (m*a)

Sur le graphe de la figure III-5- nous remarquons que le protocole d'auto-organisation LEACH d'un réseau hétérogène possède une période de stabilité meilleur et presque constante si le degré d'hétérogénéité (**m*a**) est supérieur à **0.3**.

III-5-2- La durée de vie du réseau et quantité d'information :

Les graphes de figure III-6- et figure III-7- montrent que l'augmentation des paramètres d'hétérogénéité du réseau permettant respectivement de prolonger la durée de vie du réseau et d'augmenter la quantité d'information reçue par la station de base.

La figure III-6- montre que la simulation de protocole d'auto-organisation LEACH dans un réseau hétérogène avec un facteur supplémentaire d'énergie alpha égal à 3 (**a=3**) et un pourcentage des nœuds avancés **m** égal à 20% donne une durée de vie du réseau triple (*100% nœuds morts*) par rapport au réseau homogène (m=0 et a=0).

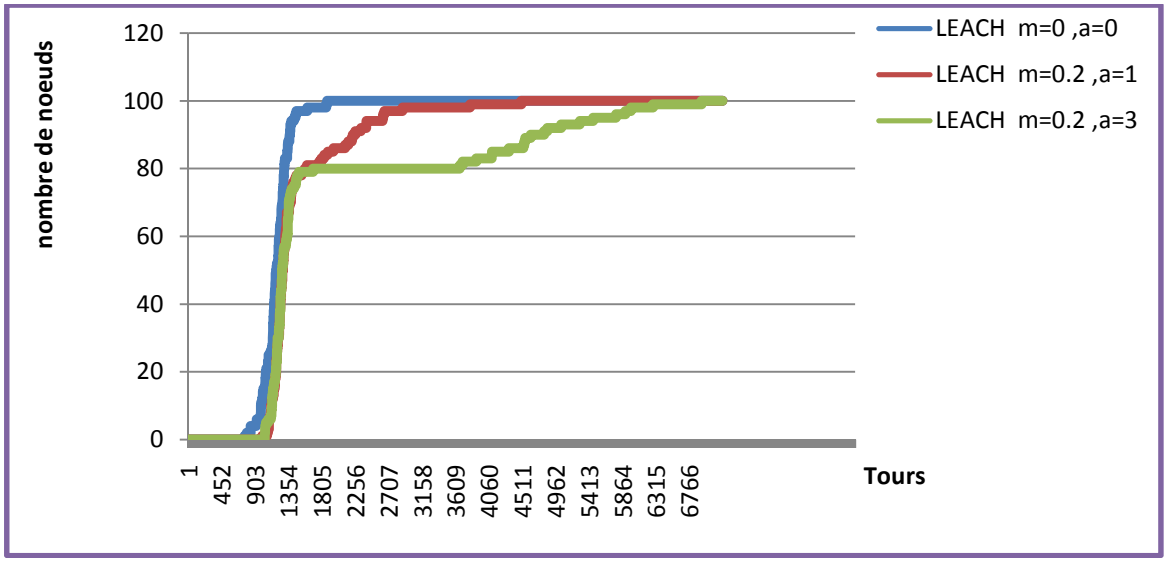


Figure III-6- Le nombre de nœuds morts en fonction de round

En terme de quantité de données reçus par la station de base, la figure III-7- montre que le protocole LEACH dans un réseau de : m=0.2 et a=2 assure la transmission de jusqu'à 17505 messages devant 11977 messages pour un réseau homogène (m= a=0), soit par conséquent un gain de 46% environ.

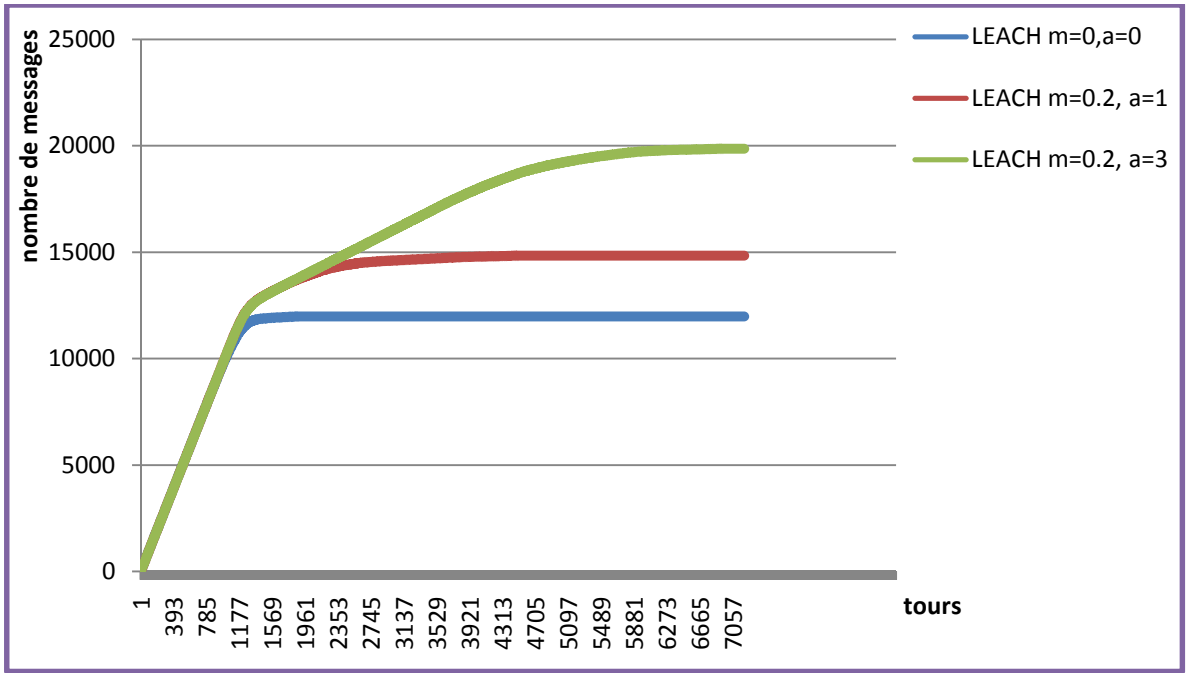


Figure III-7- Nombre de messages reçus par la station de base en fonction de rounds

Les résultats obtenus sont résumés par le Tableau III-2- suivant :

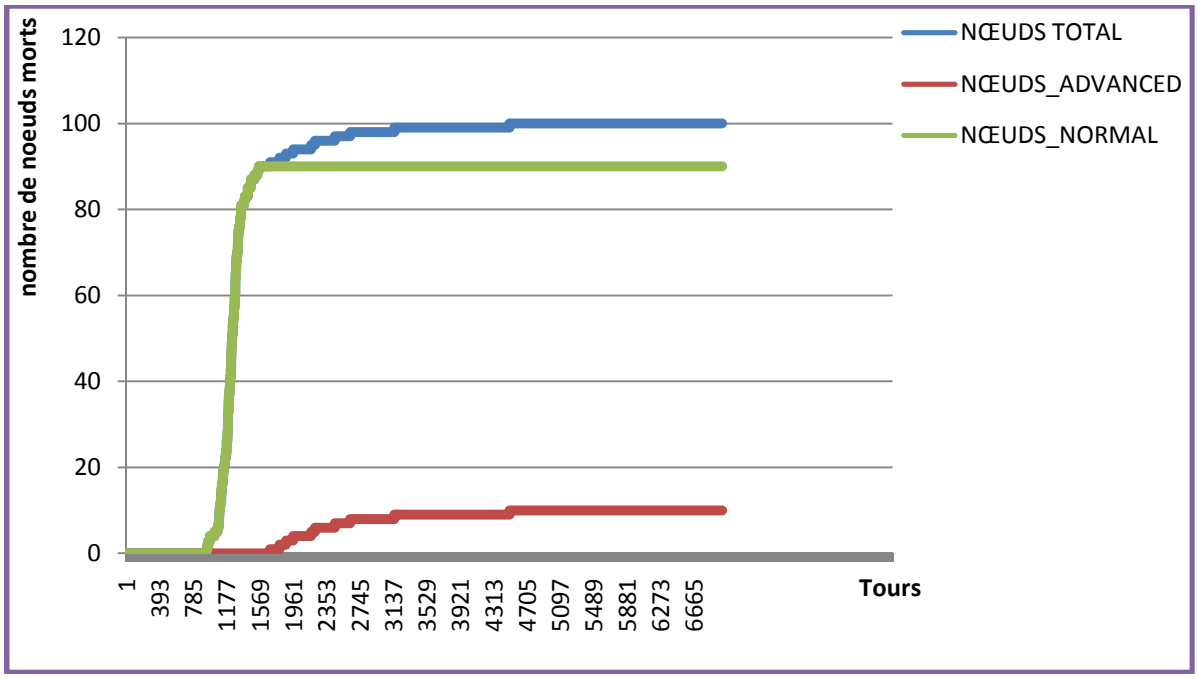
Paramètres d'hétérogén -éité	m=0 a=0	m=0.1 a=1	m=0.2 a=1	m=0.1 a=2	m=0.25 a=2	m=0.2 a=2.5	m=0.2 a=3	m=0.35 a=2	m=0.2 a=3.5	m=0.3 a=3
La durée de vie (tours)	1876	4504	4502	6001	6302	6386	6934	6195	7785	7304
Nombre de messages reçus par SB	11977	13585	14832	15379	18454	18595	19869	20516	21288	23070

Tableau III-2- Durée de vie du réseau (métrique LND) et nombre de messages reçus par SB

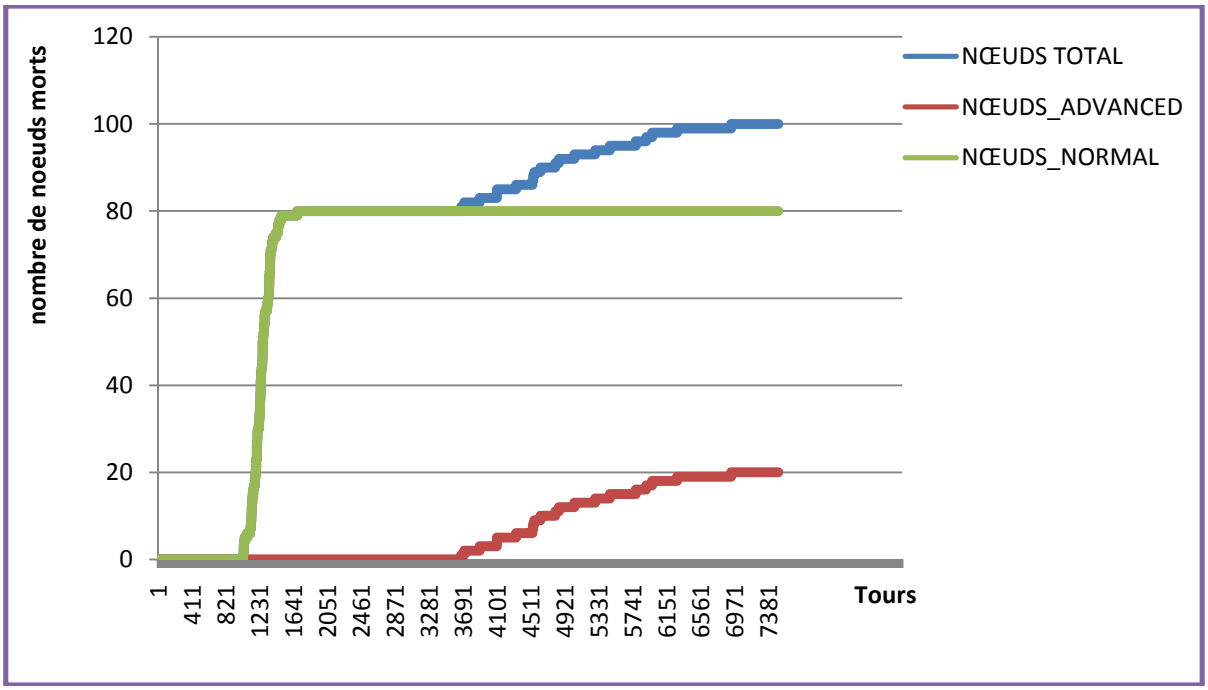
Les résultats obtenus précédemment montrent que la durée de vie et la quantité de données peut être améliorée par l'augmentation des paramètres d'hétérogénéité voire Tableau III-2- ; mais la région de stabilité reste toujours constante (m*a>0.3) voire figure III-5- .

Les graphes de la figure III-8-(a)-(b)-, présentent le nombre de nœuds normaux morts ainsi que les nœuds avancés pour les deux réseaux hétérogène (m=0.1 ; a=1) et (m=0.2 ; a=3), montrant que :

La durée de vie des nœuds avancés est plus grande par rapport aux nœuds normaux parce que la probabilité d'être CH(**P**) est unique pour tous les nœuds du réseau ;



_(a)_ m=0.1 ; a=1



_(b) _ m=0.2 ; a=3

Figure III-8- nombre de nœuds morts par types de nœuds en fonction de tours

Pour l'amélioration des résultats obtenus en terme de période de stabilité du réseau, nous utilisons le protocole auto-organisateur SEP, qui basé sur le même principe d'algorithme d'auto-organisation LEACH mais avec deux probabilités d'élection des cluster-heads.

III-6- Le Protocole SEP (Stable Election Protocol) :

Dans [ADE 09] les auteurs proposent l'algorithme SEP comme un nouveau protocole d'auto-organisation efficace en consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs hétérogène (composé de nœuds normaux et de nœuds avancés).

SEP est un algorithme basé sur les groupes (cluster). Ce protocole est similaire à LEACH, dans le quel les cluster-heads des clusters élus collectent les données à partir de tous les nœuds capteurs appartenant à leur groupe, agrègent les données rassemblées par des procédures de fusion, et transmettent ces données directement à la station de base.

Les cluster-heads des groupes élus demeurent ainsi pour une période de temps appelée « round, tour ». Au début de chaque tour, chaque nœud détermine la possibilité d'être un cluster-herd (chef) de cluster pendant la période en cour, s'il décide d'être, il annonce sa décision à tous ses nœuds voisins.

Les autres nœuds qui décident de ne pas être un cluster-head de clusters, se joignent à l'un des cluster-head élus après avoir reçu leurs décisions.

Les cluster-heads des groupes (clusters) sont sélectionnés périodiquement en se basant sur l'énergie résiduelle initiale du nœud, et comme le réseau hétérogène est composé de deux types de nœuds : **m*n** nœuds avancés à énergie initiale est égale à $\mathbf{E_0 (1+a),}$

(1-m)*n nœuds normaux à énergie initiale est égale à $\mathbf{E_0,}$

SEP utilise la même stratégie que LEACH pour l'organisation de réseau, mais adopte une approche différente pour l'élection des cluster-heads. Durant cette étape, SEP utilise deux probabilités des cluster-heads sur le réseau :

Une probabilité pour les nœuds avancés P_{ADV} ,

Une probabilité pour les nœuds normaux P_{NOR} ,

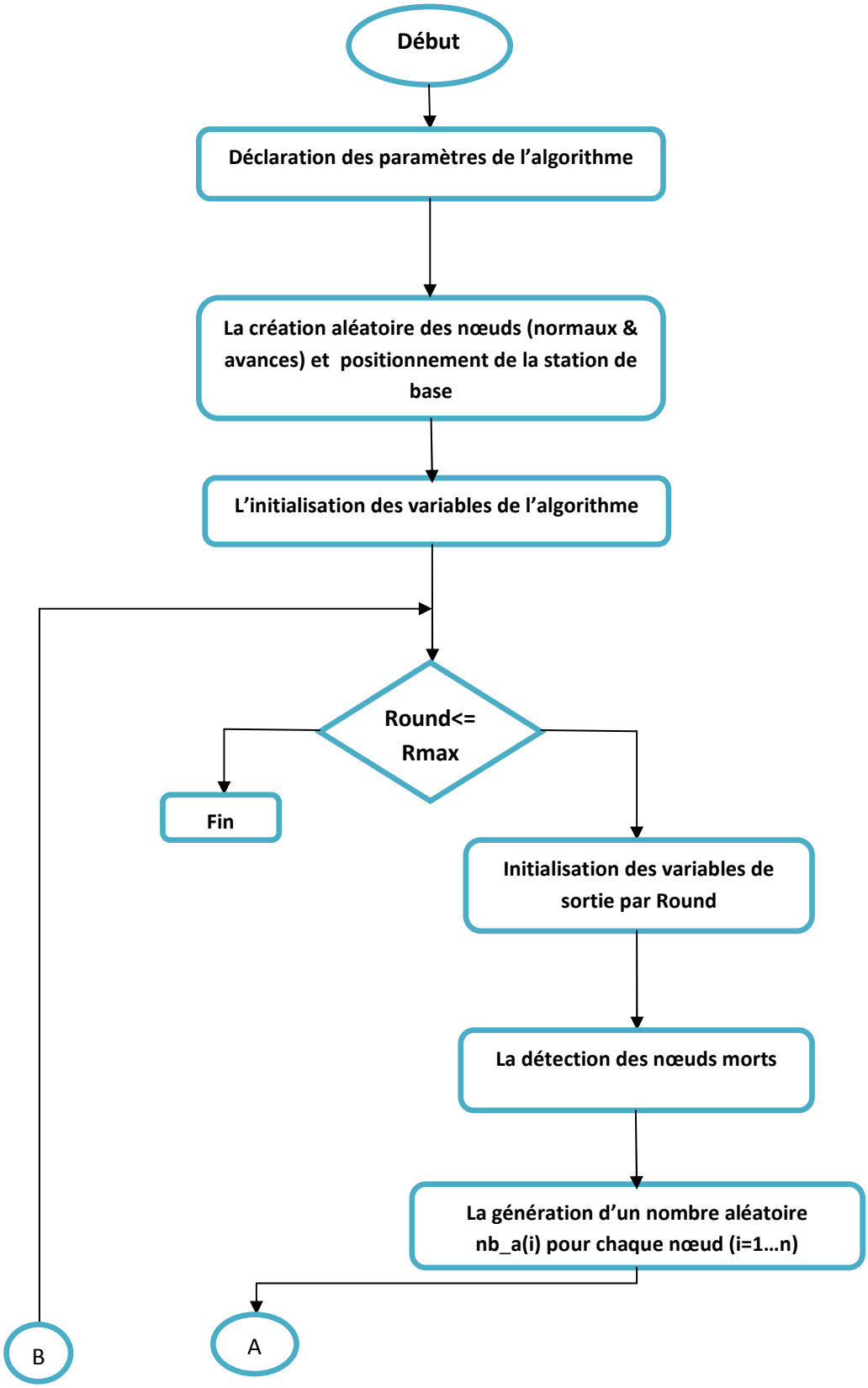
Avec : $\mathbf{P_{NOR} = P_{Opt} / (1+a*m),}$

$\mathbf{P_{ADV} = P_{Opt} *(1+a) / (1+a*m),}$

La probabilité optimale $\mathbf{P_{Opt}}$ donnée par la courbe de la figure II-7-(page 45).

Donc l'objectif visé par le protocole SEP est : Les nœuds avec une grande énergie résiduelle à plus de chance de s'élire cluster-head $\mathbf{(P_{NOR} < P_{ADV})}$.

III-6- 1- L'organigramme De Protocole SEP



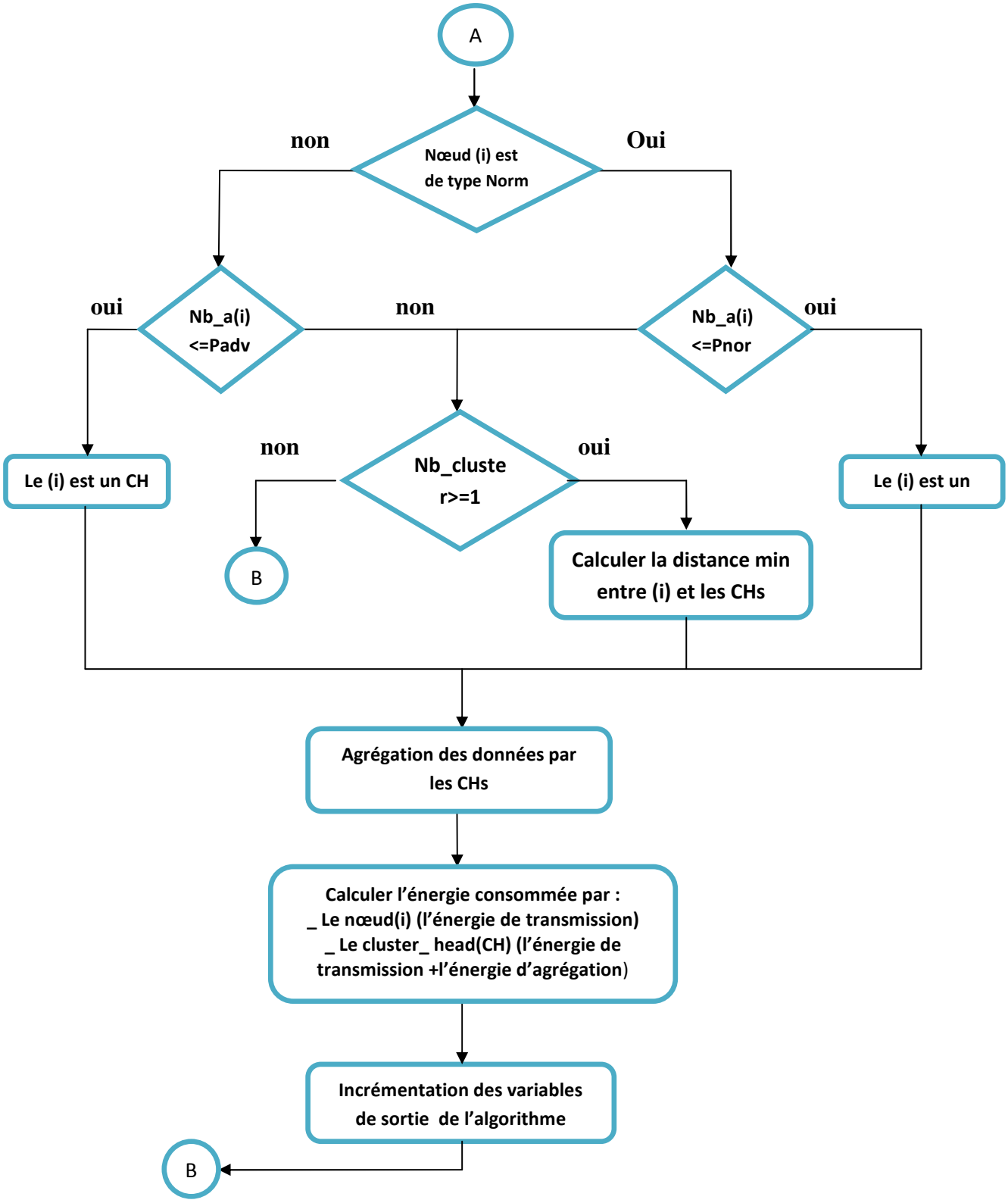


Figure III-9 - L'organigramme De Protocole SEP

III-7- Résultats de Simulations du Protocole SEP :

Notre travail est effectué dans un réseau de capteurs qui possède les mêmes paramètres mentionné par le tableau III-1-

III-7-1- La Période de stabilité :

Pour mieux évaluer la performance de protocole SEP par apport au protocole LEACH en termes de période de stabilité. Nous avons simulé les deux protocoles plusieurs fois, les résultats obtenus sont représentés par le tableau et la figure donnée ce dessous :

Paramètres **m*a**	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Période de stabilité (tours) ***LEACH***	761	942	997	1011	1030	1032	1032	1038	1036	1063
Période de Stabilité (tours) ***SEP***	761	1058	1086	1156	1220	1248	1280	1339	1370	1420

Tableau III -3- Tableau comparatif en termes de période de stabilité du réseau

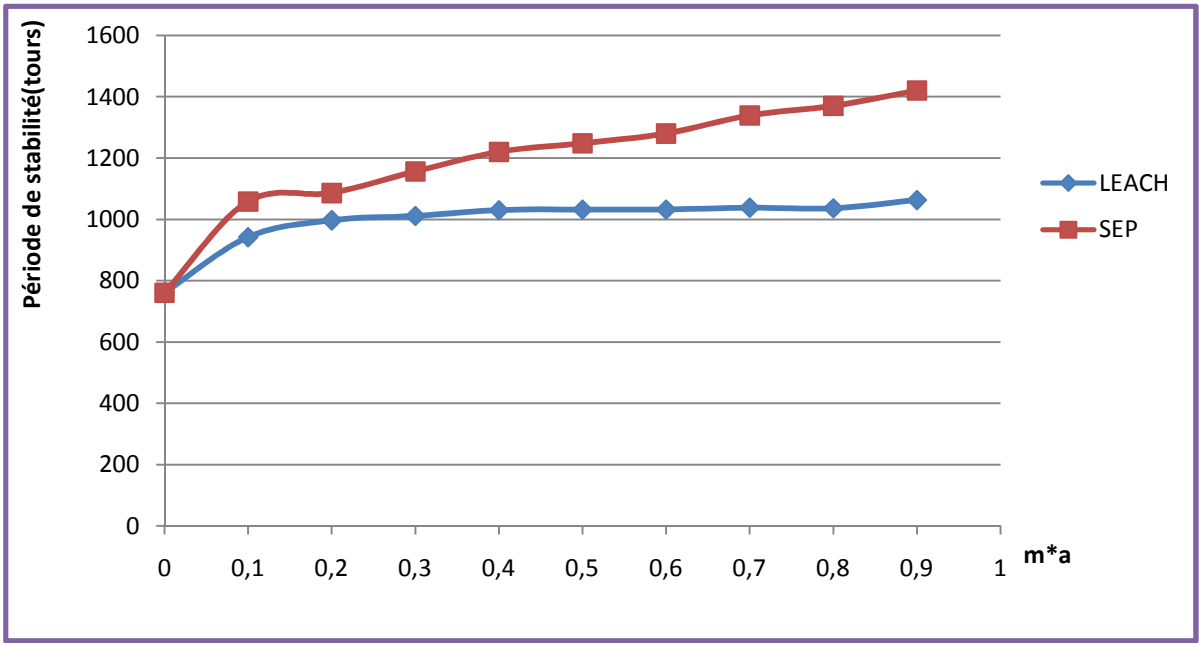


Figure III-10- Région de Stabilité du réseau en fonction de Degré d'Hétérogénéité

La figure-III-10- présente la période de stabilité de réseau en fonction du degré d'Hétérogénéité des nœuds réseau. Nous constatons que le protocole SEP assure une augmentation plus vite de la période de stabilité que le protocole LEACH.

Nous avons évalué les performances de protocole SEP avec les mêmes paramètres donnés par le tableau III-1- avec plusieurs scénarios ; ceci dont le but de connaitre l'impact de degré d'Hétérogénéité de réseau sur les performances de ce protocole.

Les résultats du Tableau III-4, montrent que la performance en termes de la période de stabilité ne dépend pas de la valeur individuelle des paramètres d'Hétérogénéité **m** et **a** mais dépend de leur produit (**m*a**), qui représente la quantité totale d'énergie supplémentaire initiale du réseau apporté par les nœuds avancés. Nous constatons que la période de stabilité du réseau (scenarios m=0.3, a=1) avec le protocole SEP est prolongée de **13.55%** qu'avec le protocole LEACH ; et une augmentation significative de la période de stabilité est égale à **24%** pour un scenario de m=0 .2 et a=3.

Paramètres d'hétérogén--éité	**m*a=0.2**		**m*a=0.3**		**m*a=0.5**		**m*a=0.6**		**m*a=0.7**	
	0.1*2	0.2*1	0.1*3	0.3*1	0.2*2.5	0.25*2	0.2*3	0.3*2	0.2*3.5	0.35*2
Période de stabilité **(SEP)**	1086	1083	1156	1148	1259	1248	1280	1287	1339	1346

Tableau III-4- Période de stabilité du réseau avec le protocole SEP en fonction de m*a

III-7-2- Durée de vie :

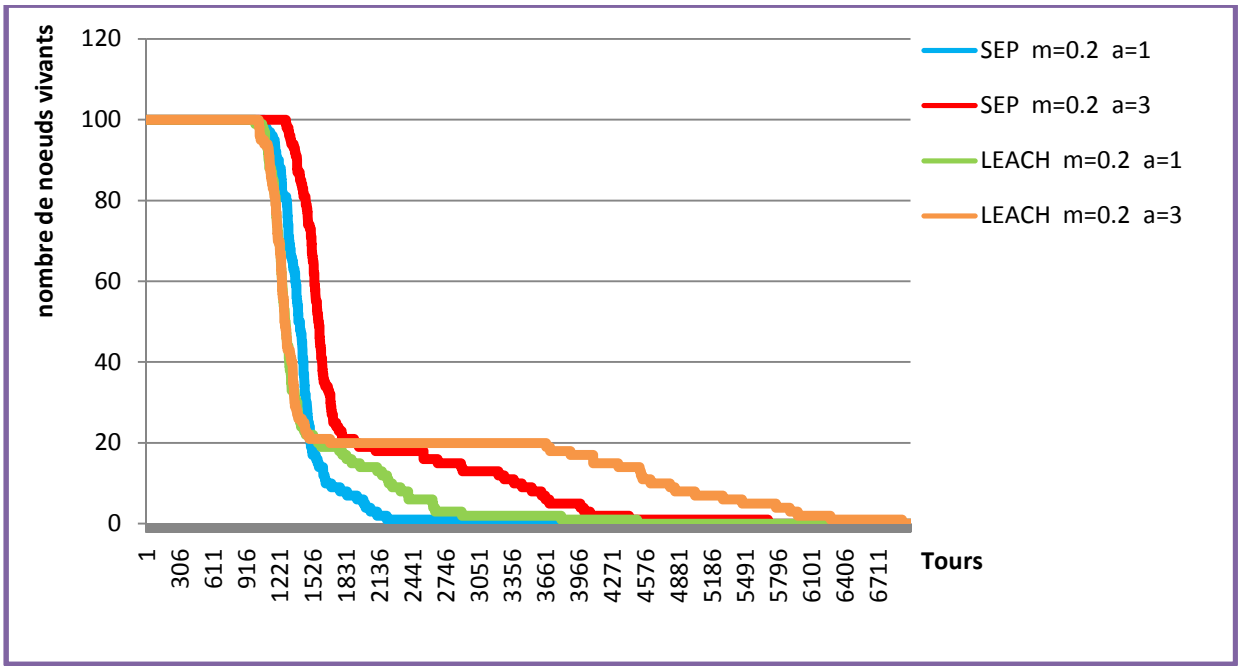
Le tableau III-5- et les graphes de la figure III-11-, récapitulent les résultats des simulations qui déterminer le nombre de rounds (durée de vie du réseau) quand 5%, 20%, 50%, 90%, 95% et 100% des nœuds meurent.

Paramètres d'hétérogénéité du réseau m et a : ***m=0.1 ; a=2***						
Nombre de nœuds morts	5%	20%	50%	90%	95%	100%
Durée de vie ***LEACH*** (Tours)	1034	1148	1247	1626	3815	4851
Durée de vie ***SEP*** (Tours)	1173	1274	1358	1561	1748	4175

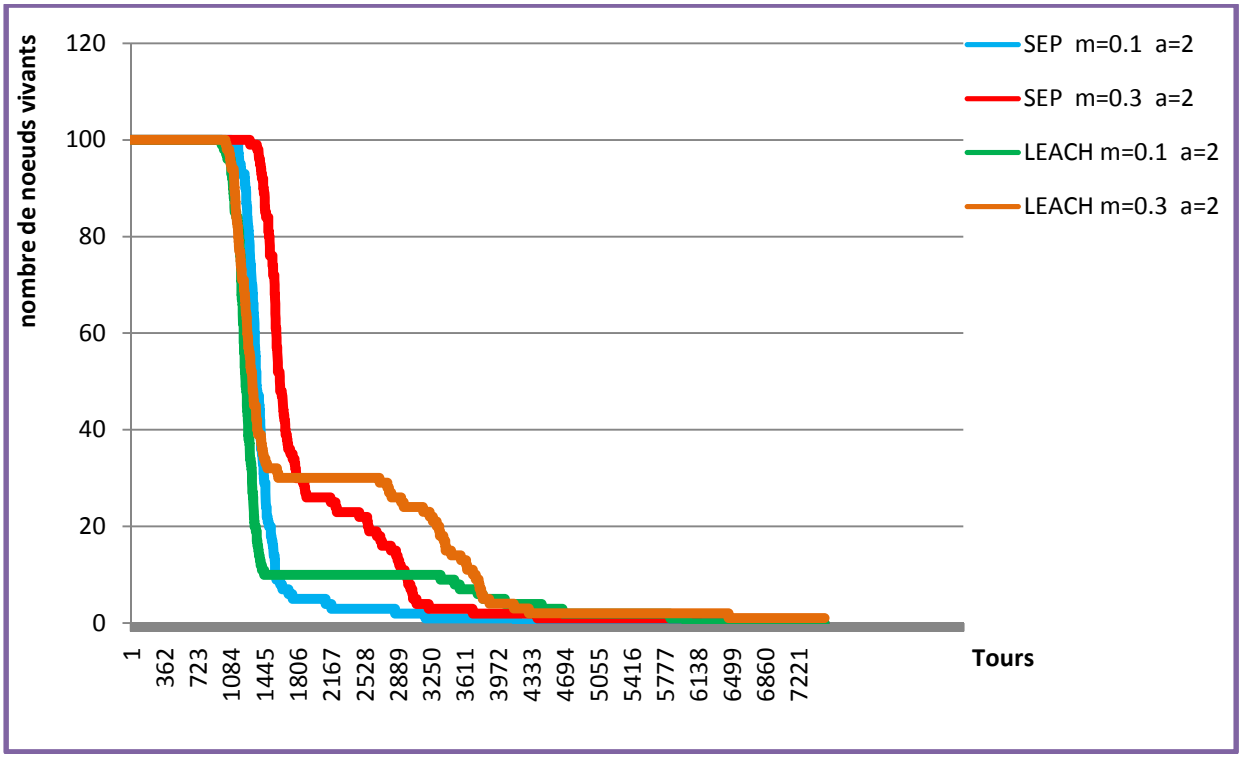
Paramètres d'hétérogénéité du réseau m et a : ***m=0.3 ; a=2***						
Nombre de nœuds morts	5%	20%	50%	90%	95%	100%
Durée de vie ***LEACH*** (Tours)	1079	1159	1311	3698	3806	7509
Durée de vie ***SEP*** (Tours)	1397	1494	1612	2962	3051	6113

Tableau III –5- Comparaison entre LEACH & SEP en terme de durée de vie du réseau

La simulation montre que la durée de vie du réseau dure plus longtemps avec le protocole SEP qu'avec le protocole LEACH, si le taux nécessaire des capteurs vivants pour garantir la couverture totale de la zone d'intérêt α-coverage est supérieur du pourcentage des nœuds avancés(m)**.**



-(a)-

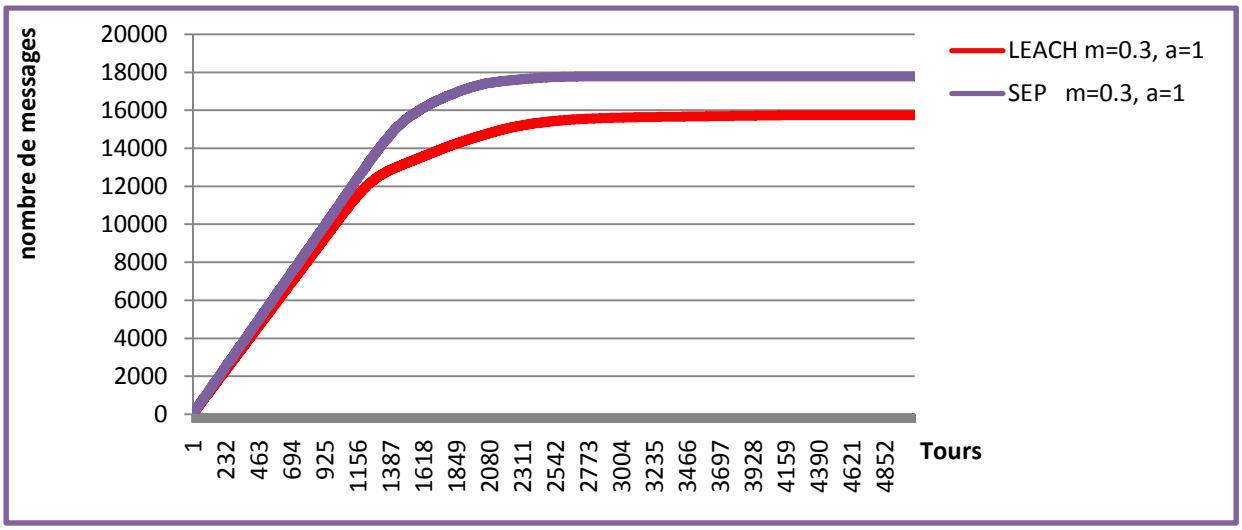


-(b)-

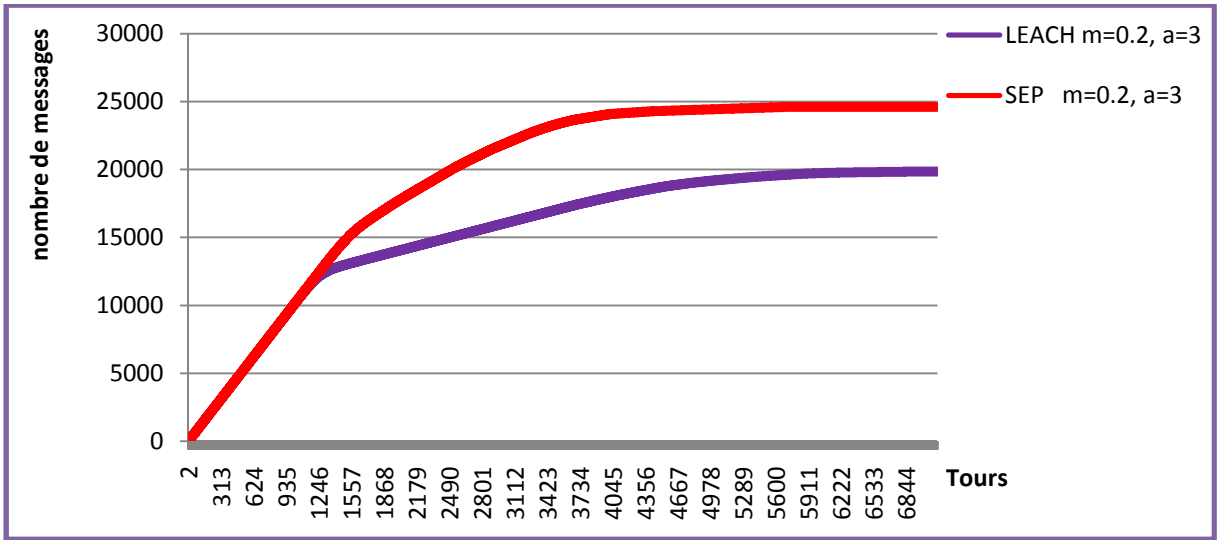
Figure III-11- Le nombre de nœuds vivants en fonction de tours

III-7-3- Quantité d'information :

La figure III-12- illustre que SEP envoie plus de paquets à la station de base durant la durée de vie du réseau que LEACH. Il dépasse respectivement le LEACH (m=0.3, a=1) et (m=0.2, a= 3) de 10% et de 19%.



_ (a) _



_ (b) _

Figure III-12- nombre de messages reçus par la station de base en fonction de tours

III-8- Résultats de simulation de protocole Z-SEP:

III-8- 1- La durée de vie de réseau & quantité d'information :

Avec l'utilisation des mêmes paramètres utilisé par les protocoles LEACH et SEP la simulation de protocole Z-SEP donne les résultats suivants :

Paramètres d'hétérogénéité du réseau **m** et **a** : *m=0.2 ; a=1*							
Protocoles	Période de stabilité	Nombre de nœuds morts					Quantité d'information
		10%	50%	70%	95%	100%	
LEACH	997	1122	1274	1372	2626	4502	14745
SEP	1083	1198	1397	1465	1993	3296	14950
Z-SEP	1521	1624	2015	2209	3474	3809	219365
Paramètres d'hétérogénéité du réseau **m** et **a** : *m=0.3 ; a=2*							
Protocoles	Période de stabilité	Nombre de nœuds morts					Quantité d'information
		10%	50%	70%	95%	100%	
LEACH	1024	1119	1311	1593	3806	7510	19743
SEP	1287	1431	1612	1789	3051	6113	24239
Z-SEP	1440	1621	2071	2274	5232	5601	279478

Tableau III-6- Tableau comparatif des résultats de simulations

Le Tableau III-5- montre l'efficacité du protocole Z-SEP par rapport aux protocoles SEP et LEACH. En comparant les résultats obtenus, nous remarquons que le protocole Z-SEP, permet d'assurer de meilleures performances :

En termes de période de stabilité du réseau le protocole Z-SEP augmente la région de stabilité du réseau comparé aux protocoles SEP et LEACH

La figure III-13- montre clairement que le protocole Z-SEP est plus performant que les protocoles LEACH et SEP en terme de stabilité et durée de vie du réseau, car le protocole Z-SEP utilise deux techniques de communication, la communication directe avec la station de base utilisée par les nœuds normaux (zone Z0) sans passer par la technique de clustering qui demande une énergie supplémentaire pour l'agrégation et la réception des données assurées par les cluster-heads de groupes, et la communication par l'intermédiaire des cluster-heads des zones Z1 et Z2.

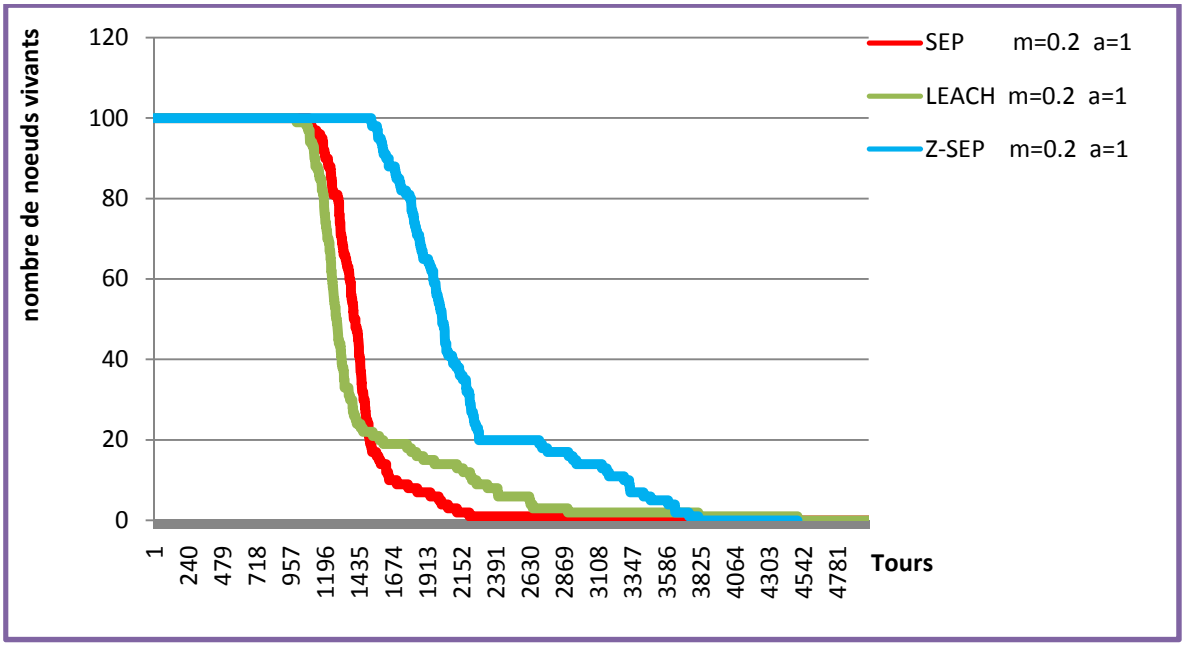


Figure III-13- Nombre de nœuds vivants en fonction de Tours

III-8-2 Quantité d'information :

Le tableau III-5, montre que le nombre de messages reçus par la station de base (débit) avec le protocole Z-SEP est mieux qu'avec LEACH et SEP, par ce que chaque nœud normal envoie directement les données vers la station de base.

III-9- L'amélioration de Protocole LEACH :

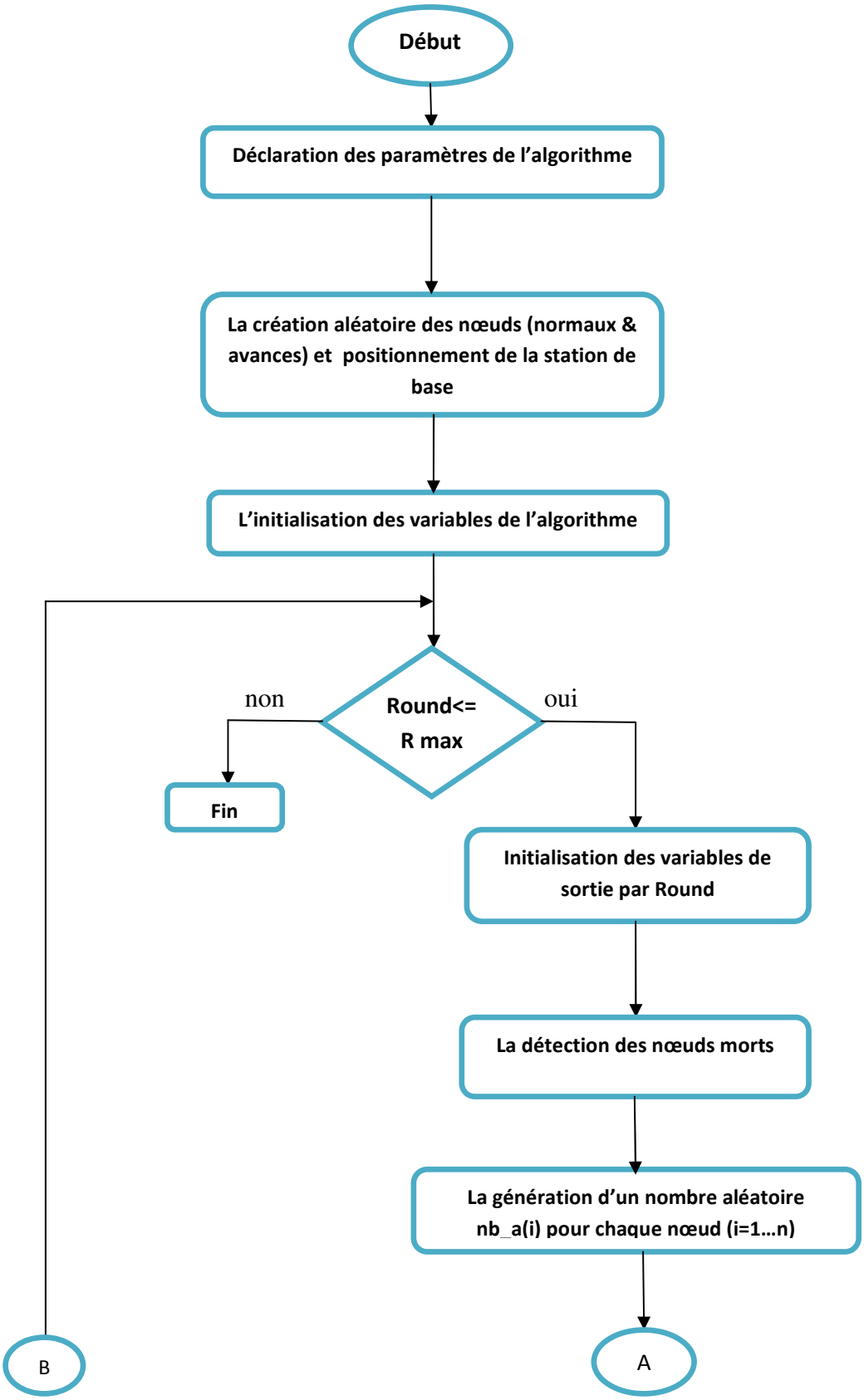
Le LEACH c'est un protocole d'auto-organisation qui permet de former et de maintenir des clusters hiérarchique. LEACH sélectionne périodiquement des cluster-heads (aussi nommés chefs de groupes) afin de mieux distribuer la consommation d'énergie, chaque cluster head collecte et compresse les données de ses membres avant de les transmettre vers la station de base. La station de base est un nœud particulier doté d'une puissance de calcul supérieure et d'une quantité d'énergie potentiellement infinie.

Pour améliorer le protocole LEACH, On s'est basé sur :

- L'utilisation de la station de base comme un nœud d'agrégation des données, puis -qu'elle est dotée d'une puissance de calcul supérieur et d'une énergie infinie.
- L'idée du protocole Z-SEP concernant la communication directe des nœuds qui sont proche de la station de base par rapport aux cluster-heads des clusters formé par round (tour).

Et dans le cas d'absence de chefs de groupes, le nœud capteur communiquera directement avec la station de base.

III-9-1- L'organigramme de Protocole LEACH modifié :



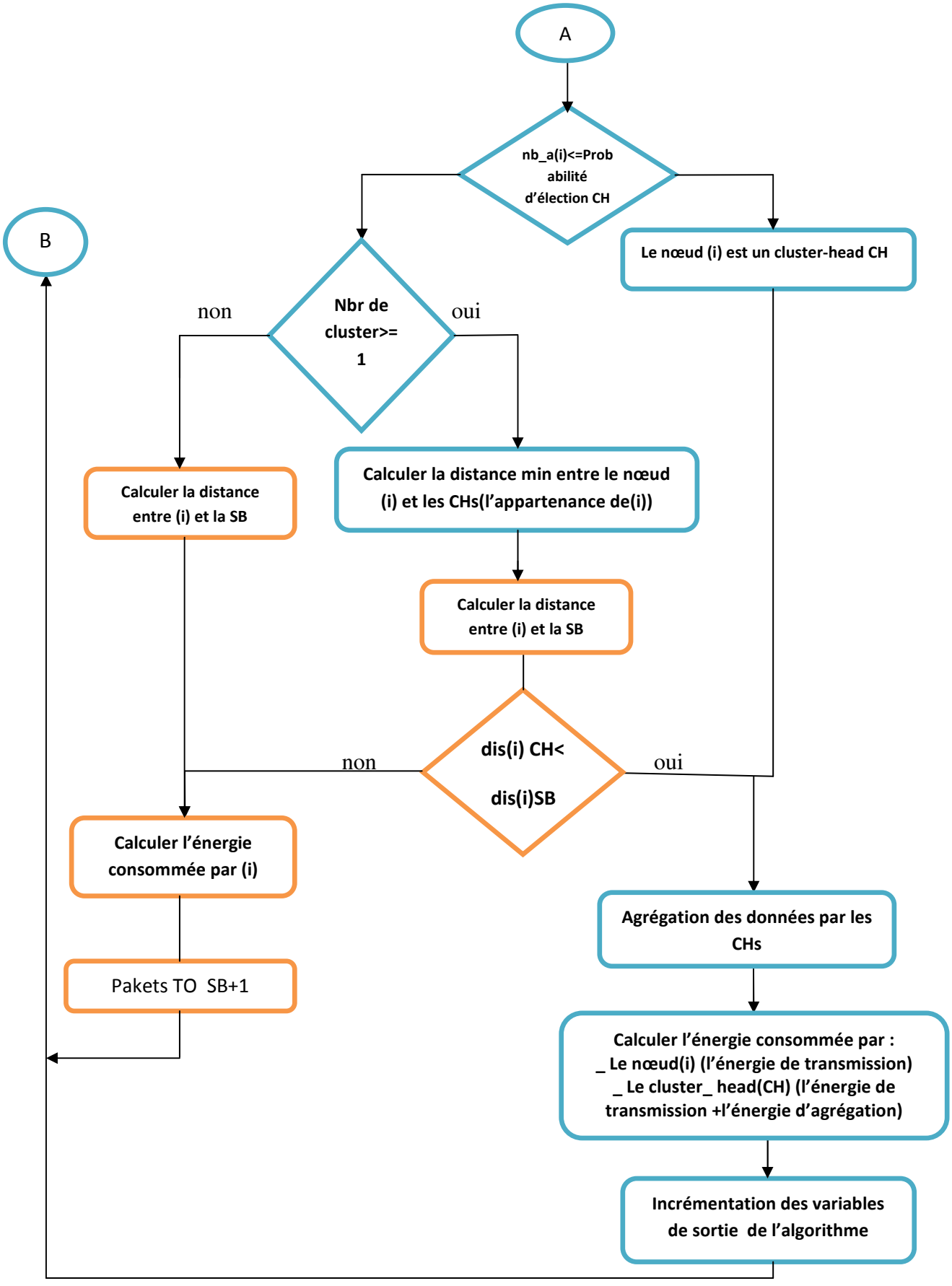


Figure III-14- L'organigramme De Protocole LEACH modifié

III-9-2- Résultats des Simulations de Protocole LEACH modifié :

- ***Période de stabilité*** :

Dans ce qui suit, nous présentons puis analysons les résultats des simulations obtenus avec les deux protocoles LEACH et LEACH-m (LEACH modifié).

Plusieurs expérimentations ont été réalisées en tenant compte de la densité du réseau. Nous avons considéré quatre réseaux avec des densités de 50, 100,200 et 400 nœuds. Les résultats obtenus pour chacun des réseaux en termes de période de stabilité du réseau sont illustrés dans le tableau III-6-

Nombre de Nœuds	***Période de stabilité*** Réseau Homogène ***m=a=0***		***Période de stabilité*** Réseau Hétérogène ***m=0.3 et a=1***		***Période de stabilité*** Réseau Hétérogène ***m=0.2 et a=3***	
	LEACH	LEACH-m	LEACH	LEACH-m	LEACH	LEACH-m
50	812	1061	1055	1165	1073	1138
100	761	1032	1011	1079	1032	1062
200	743	980	1007	1054	990	1032
400	747	946	955	990	903	997

Tableau III-7 - Période de stabilité en fonction de densité du réseau (comparaison)

Comme l'illustre la figure III-15-, Les résultats de simulation d'un réseau homogène montrent que le protocole LEACH-m présente de meilleures performances en terme de période de stabilité du réseau que le protocole LEACH quelque soit la densité réseau. Par exemple, pour un réseau homogène de 100 nœuds de densité, on constate une amélioration de période de stabilité de 35.61%.

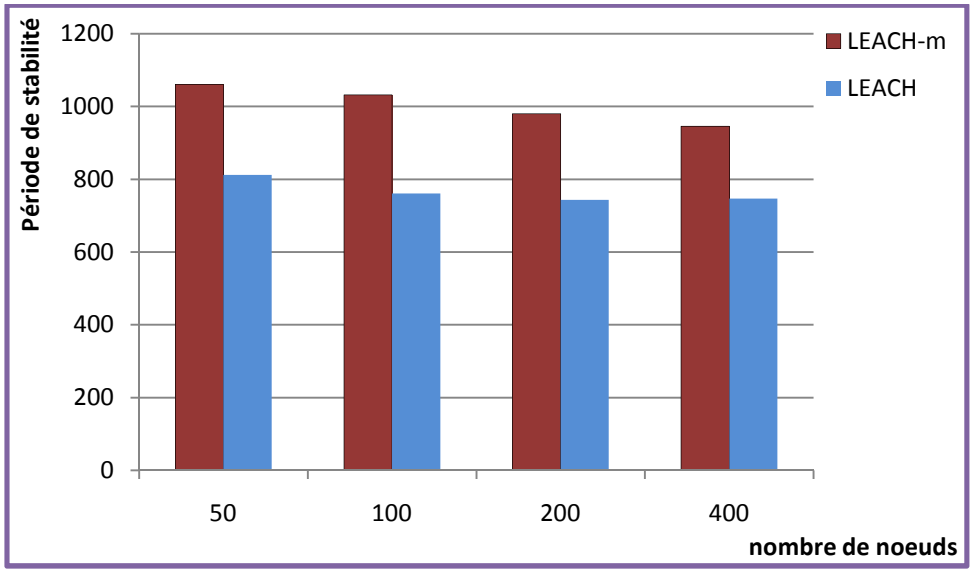
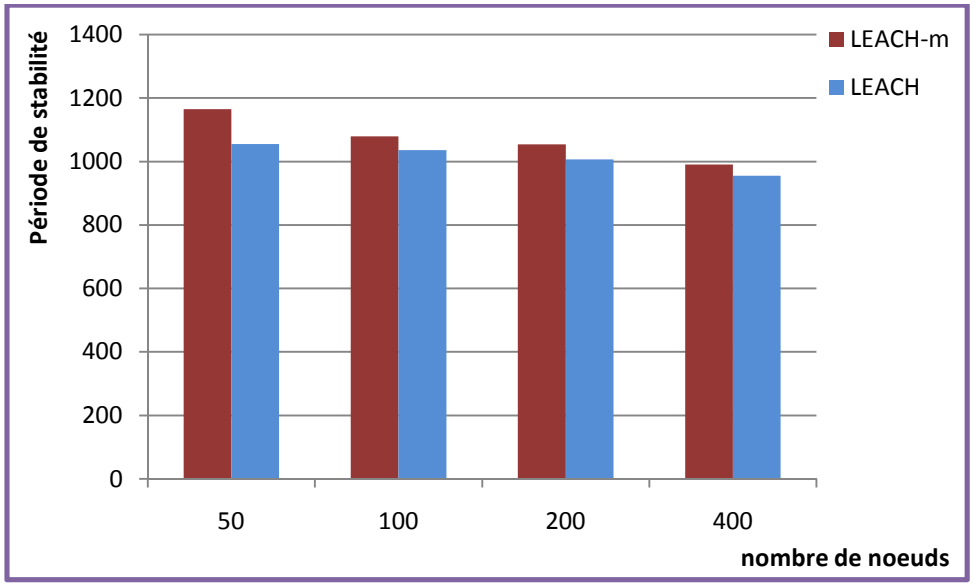
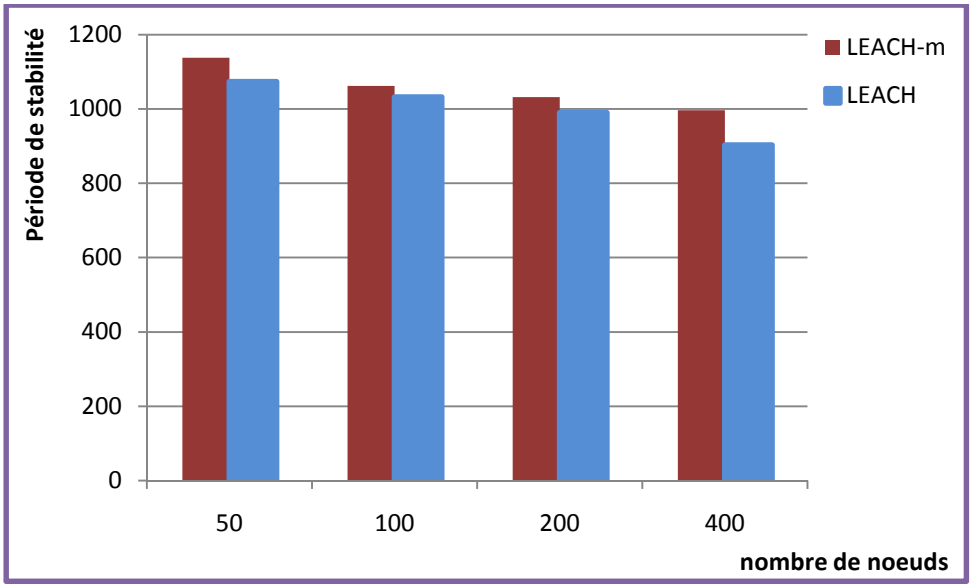


Figure III-15- Période de stabilité d'un réseau homogène en fonction de nombre de nœuds

Les figures III-16-(a) et (b) illustrent respectivement les périodes de stabilité des réseaux hétérogène (m=0.3, a=1) et (m=0.2, a=3)



_(a)_ Réseau avec ***m=0.3 et a=1***



_(b) _ Réseau avec ***m=0.2 et a=3***

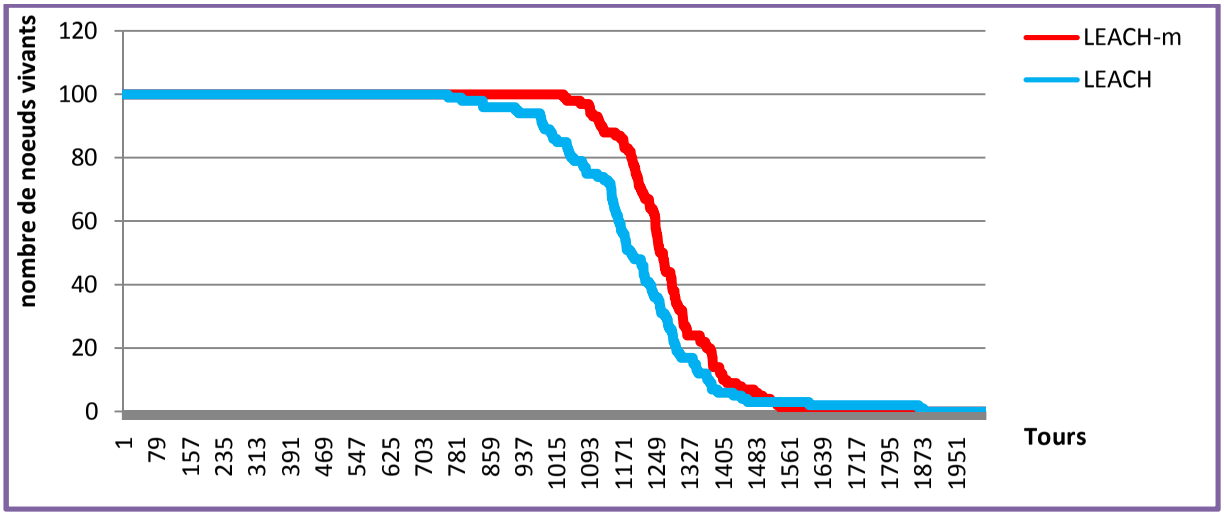
Figure III-16- Période de stabilité d'un réseau hétérogène en fonction de nombre de nœuds

On remarque que la période de stabilité avec le protocole LEACH-m est meilleure que le protocole LEACH quelque soit le degré d'hétérogénéité et densité du réseau.

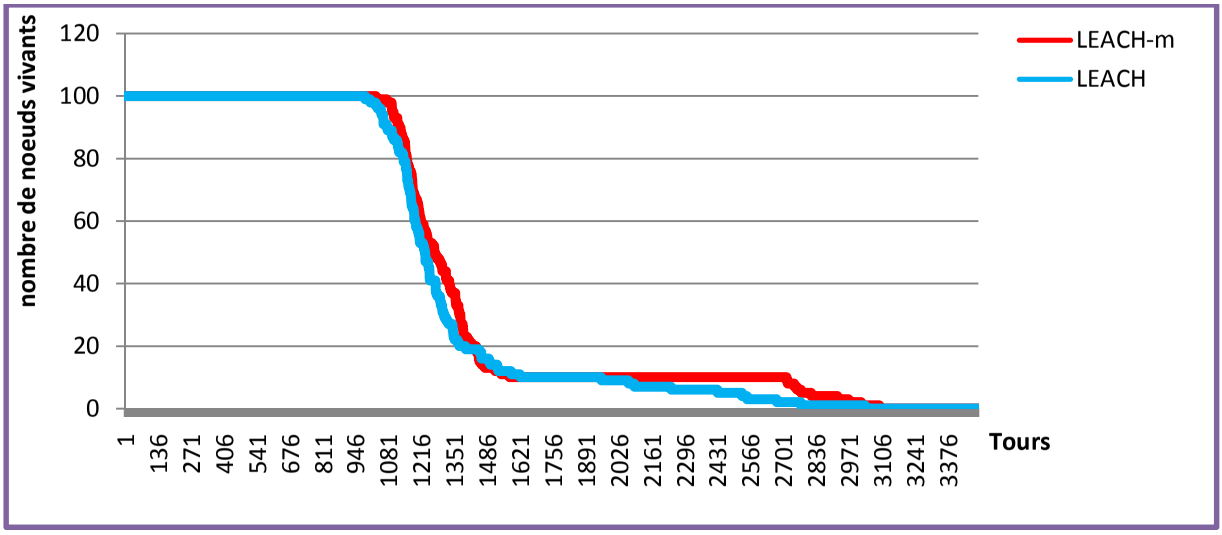
Par conséquence, ces résultats montrent la bonne performance de notre algorithme LEACH-m, car nous avons prolongé la durée de stabilité du réseau. Pour un réseau hétérogène à 50 nœuds avec les paramètres d'hétérogénéité m=0.3 et a=1, on peut conclure une augmentation de la période de stabilité de 1055 tours à 1165 tours, donc une amélioration de 10%.

- ***Durée de vie du réseau :***

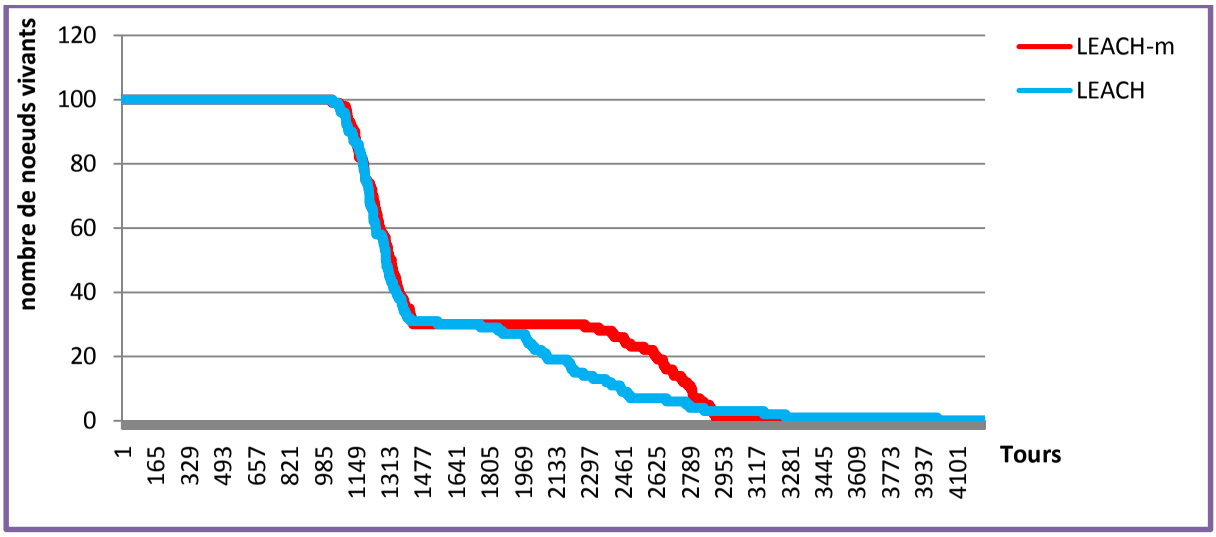
Les figures III-17-a-b-c- qui correspondent respectivement à une topologie homogène de 100 nœuds, et deux autre topologies hétérogène de 100 nœuds avec :(m=0.1, a=1) et (m=0.3, a=1) montrent la durée de vie des trois réseaux avec les protocoles LEACH et LEACH-m.



-(a)- ***Réseau homogène (m=a=0)***



-(b)- ***m=0.1 et a=1***



-(c)- ***m=0.3 et a=1***

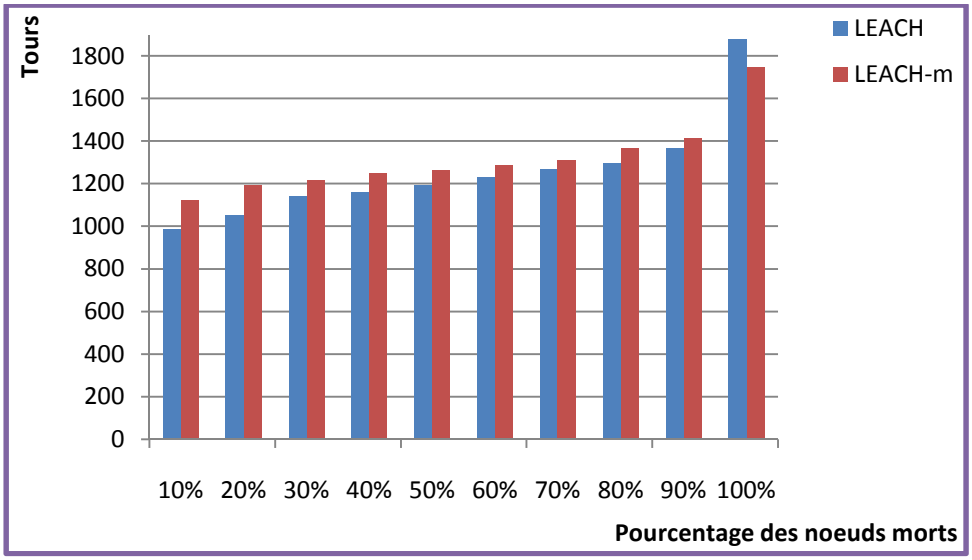
Figure III-17- Durée de vie du réseau en fonction de Tours (100 nœuds)

Le tableau présenté ci-dessous résume les résultats des simulations effectuées :

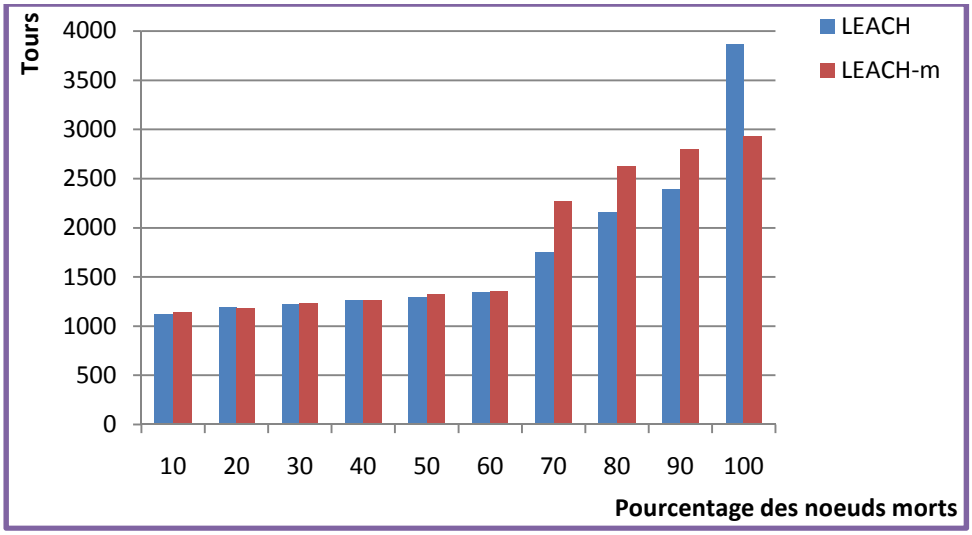
Nœuds vivants	***Réseau Homogène de :***							
	50 Nœuds		***100 Nœuds***		***200 Nœuds***		***400 Nœuds***	
	LEACH	LEACH-m	LEACH	LEACH-m	LEACH	LEACH-m	LEACH	LEACH-m
95%	852	1078	926	1094	960	1076	968	1053
50%	1200	1298	1192	1265	1193	1220	1190	1215
10%	1375	1456	1374	1414	1368	1398	1356	1396
5%	1395	1500	1449	1498	1438	1431	1412	1476
Nœuds vivants	***Réseau Hétérogène avec : m=0.3 & a=1 et de :***							
	50 Nœuds		***100 Nœuds***		***200 Nœuds***		***400 Nœuds***	
	LEACH	LEACH-m	LEACH	LEACH-m	LEACH	LEACH-m	LEACH	LEACH-m
95%	1077	1158	1111	1110	1068	1094	1086	1084
50%	1309	1362	1301	1326	1291	1304	1290	1282
10%	2357	2956	2395	2802	2408	2662	2427	2566
5%	2496	2988	2691	2886	2606	2772	2555	2694
Nœuds vivants	***Réseau Hétérogène avec : m=0.2 & a=3 et de :***							
	50 Nœuds		***100 Nœuds***		***200 Nœuds***		***400 Nœuds***	
	LEACH	LEACH-m	LEACH	LEACH-m	LEACH	LEACH-m	LEACH	LEACH-m
95%	1104	1150	1081	1127	1075	1086	1069	1055
50%	1295	1335	1272	1309	1270	1260	1267	1257
10%	5170	6050	4805	5692	4677	5376	4659	5295
5%	5827	6206	5777	6144	5049	5611	4944	5485

Tableau III-8- Durée de vie du réseau

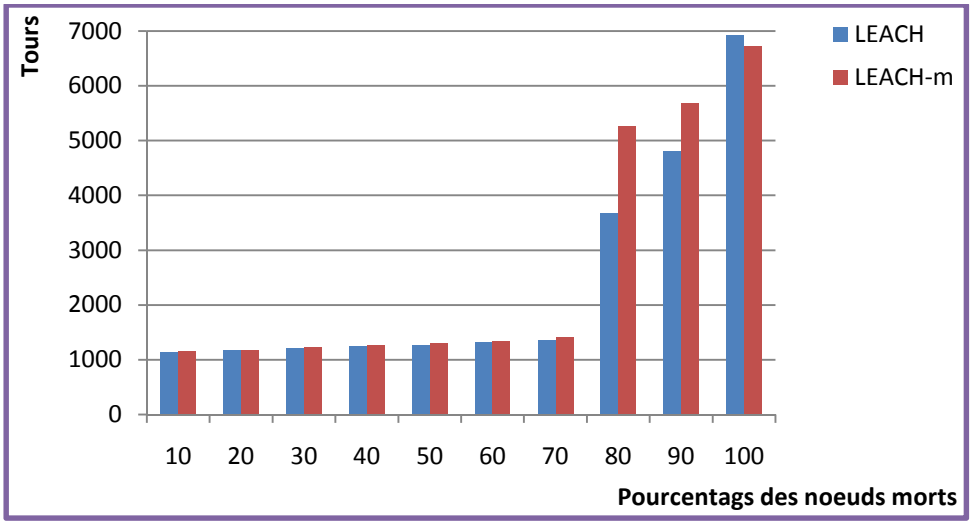
Pour mieux évoluer la performance de notre algorithme d'amélioration de protocole LEACH, nous avons présenté la durée de vie d'un réseau de ***100*** nœuds en fonction du pourcentage des nœuds morts tout au long de la durée de la simulation par la figure III-18-a-b-c-.



_ (a)_ Réseau Homogène



_(b) _ Réseau Hétérogène avec : ***m=0.3 et a=1***



_(c) _ Réseau Hétérogène avec : ***m=0.2 et a=3***

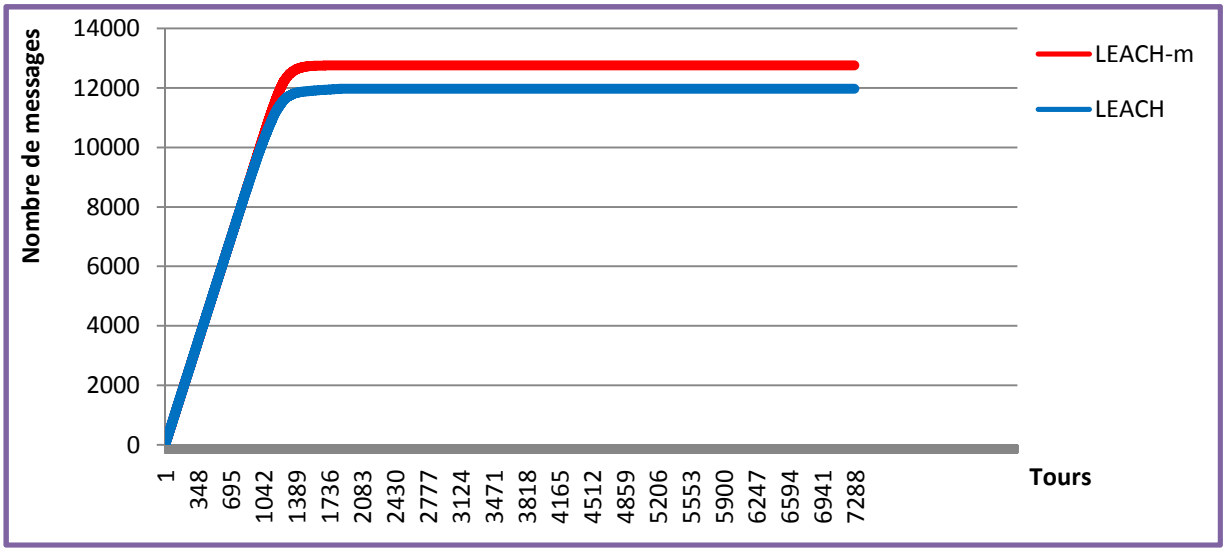
Figure III-18- Durée de vie du réseau en fonction de pourcentage des nœuds morts

Sur les histogrammes de la figure III-18-a-b-c-, nous remarquons que le protocole LEACH-m, permet d'assurer :

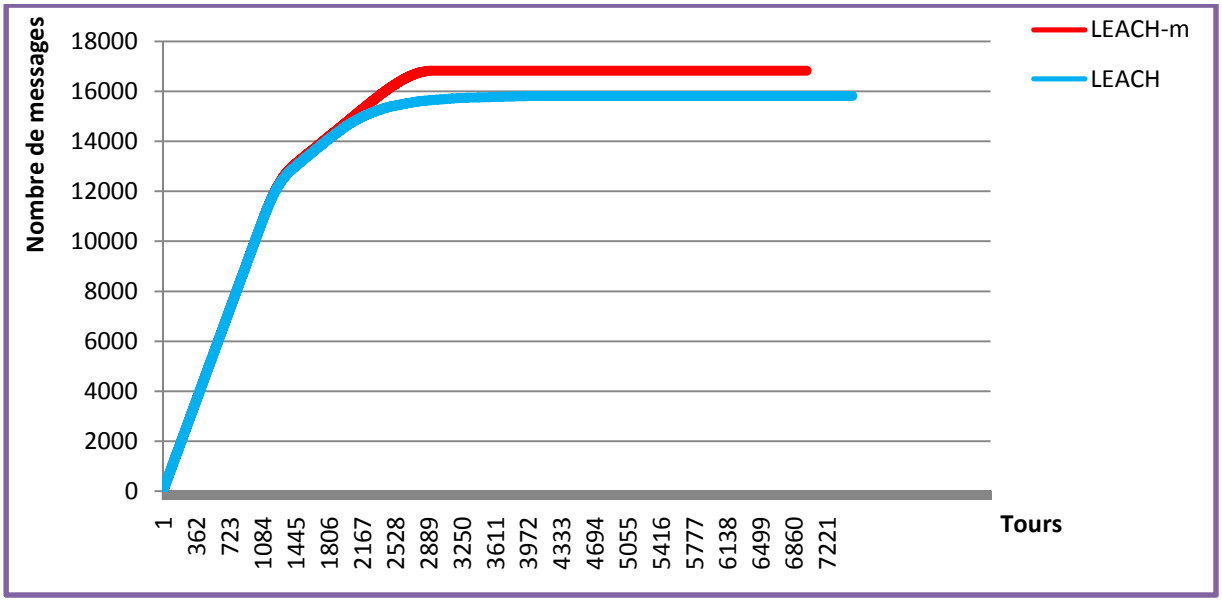
- Respectivement une augmentation de **13.77%** et de **5.55%** Pour un réseau homogène de 100 nœuds de densité et d'une durée de vie du réseau défini par le seuil des capteurs vivants α -coverage est égal à 90% puis 20%.
- Respectivement une augmentation de **2%** et de **21.75%** Pour un réseau hétérogène de 100 nœuds de densité avec m=0.3 ; a=1, et d'une durée de vie du réseau défini par le seuil des capteurs vivants α -coverage est égal à 90% puis 20%.
- Respectivement une augmentation de **2.56%** et de **42.9%** Pour un réseau hétérogène de 100 nœuds de densité avec ***m=0.2 ; a=3,*** et d'une durée de vie du réseau défini par le seuil des capteurs vivants α -coverage est égal à 90% puis 20%.

➢ ***Quantité d'information :***

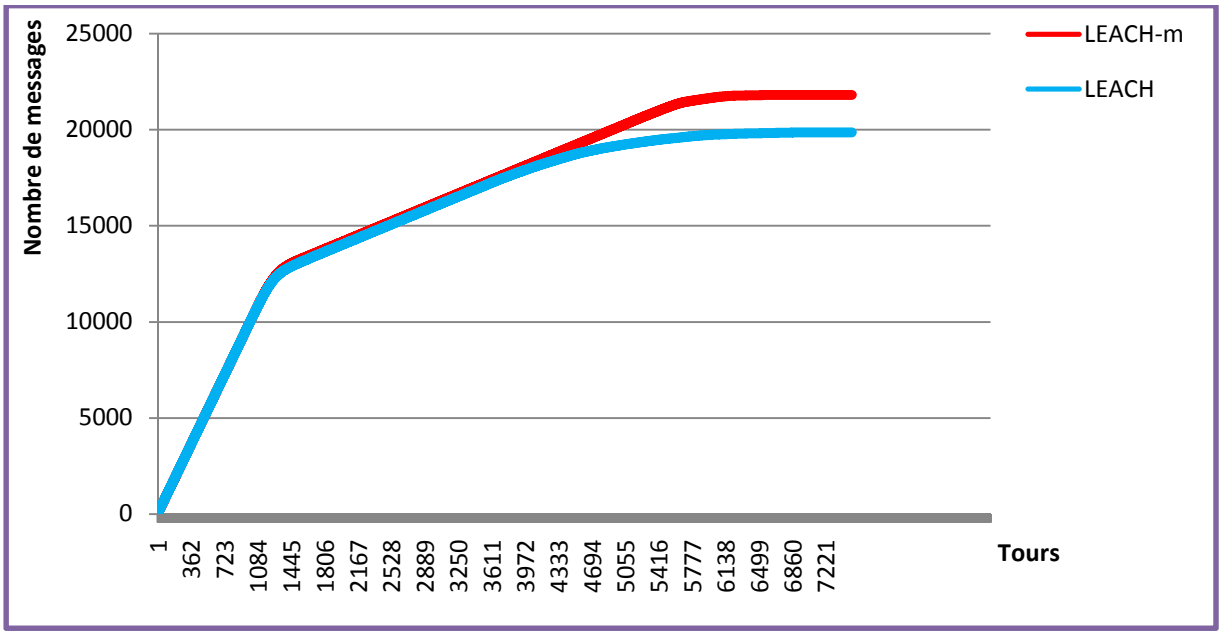
En termes de quantité de données reçus par la station de base, qui est exprimée en fonction du nombre de messages envoyés par les cluster-heads et les nœuds qui se trouvent proches de la station de base par rapport à des cluster-heads formés. La figure III-19-a-b-c- montre que le protocole LEACH-m assure respectivement la transmission jusqu'à 12762,16821 et 21815 messages, devant 11977,15736 et 19869 messages avec le protocole LEACH, pour un réseau homogène de 100 nœuds de densités, et un réseau hétérogène de 100 nœuds avec (m=0.3 ; a=1) et (m=0.2 ; a=3), soit par conséquent un gain respectivement de 6.55% ,6.8% et 9.79%.



_(a)_ Réseau homogène



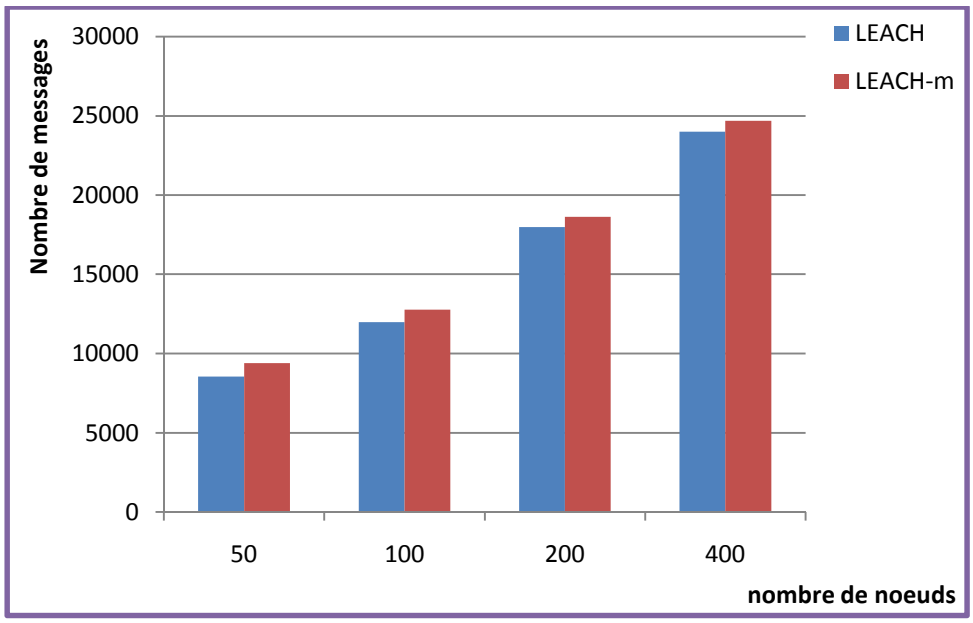
_(b) _ Réseau hétérogène avec : ***m=0.3 et a=1***



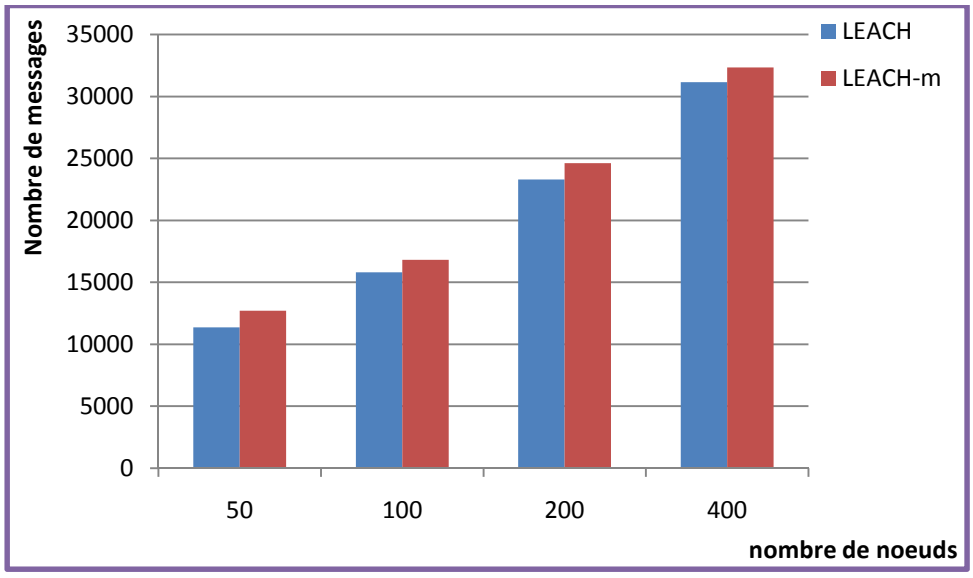
_(c) _ Réseau Hétérogène avec : ***m=0.2 et a=3***

Figure III-19- nombre de messages reçus par la station de base

La figure III-20- illustre le nombre de messages reçus par la station de base avec l'utilisation de LEACH et LEACH-m, en fonction de nombres de nœuds. On constate que le nombre de messages reçus est augmente en fonction de l'accroissement de la densité du réseau pour les deux protocoles.



_ (a)_ Réseau Homogène



_(b) _ Réseau Hétérogène avec : ***m=0.3 & a=1***

Figure III-20- Nombre de messages reçus par la station de base en fonction de nombre de nœuds

III- 10- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des simulations des protocoles d'auto-organisation : LEACH, SEP et Z-SEP. Ainsi les résultats d'amélioration du protocole d'auto-organisation LEACH, dans les réseaux sans fil homogène et hétérogène, en se focalisant sur la durée du région de stabilité, la durée de vie du réseau, et la quantité d'information reçu par la station de base.

Nous avons proposé une amélioration du protocole LEACH qui s'est basé sur :

- ✓ L'utilisation de la station de base comme un nœud d'agrégation des données.
- ✓ L'idée du protocole Z-SEP concernant la communication directe des nœuds qui sont :
  - Proche de la station de base par rapport aux cluster-heads.
  - Isolés (absence des cluster-heads).

Les résultats des simulations effectuées montrent clairement que notre amélioration de protocole LEACH, permet de meilleures prestations par rapport au protocole standard LEACH, en ce qui concerne la région de stabilité, la durée de vie du réseau, et la quantité d'information reçu par la station de base.

Conclusion Générale :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), représentent une amélioration significative par rapport aux capteurs traditionnels. L'étendue des applications des réseaux de capteurs est vaste, on les retrouve dans plusieurs domaines (militaire, santé, sécurité, environnement, etc…). Les réseaux de capteurs permettent à l'utilisateur une meilleure compréhension de l'environnement. De nos jours, les réseaux de capteurs font partie intégrante de notre vie.

L'utilisation des réseaux de capteurs sans fil présente l'intérêt de ne pas nécessiter d'infrastructure. Par exemple, dans des applications de surveillance environnementale après un accident, un grand nombre de capteurs, peuvent être déployés rapidement et aléatoirement sur des étendues géographiques. L'utilisation des batteries par les nœuds capteurs est une contrainte critique, dans les réseaux de captures, car il est difficile de changer ou de recharger les batteries de capteurs. Pour cela, les algorithmes et les protocoles de communication pour les réseaux de capteurs doivent minimiser la consommation d'énergie. Pour une utilisation efficace de l'énergie et de la capacité du réseau, plusieurs recherches se sont focalisées sur l'auto-organisation (organisation hiérarchique), dans les réseaux de capteurs.

Dans ce travail, nous avons étudié la problématique d'auto-organisation dans les réseaux de capteurs sans fil, plus précisément nous avons basé notre étude sur le protocole d'auto-organisation LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), en se focalisant sur les métriques suivantes : L'optimisation des ressources en termes de consommation d'énergie (la durée de vie du réseau), la région de stabilité du réseau, et la quantité d'information reçue par la station de base.

Nous avons proposé une amélioration sur l'approche d'auto-organisation hiérarchique LEACH, qui se base sur un mécanisme de répartition du réseau en un ensemble de groupes. Ce dernier est constitué de nœuds capteurs, qui sont représentés par un chef de groupe CH choisi selon une probabilité dite d'élection des CHs. Pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds capteurs du réseau, l'approche d'auto-organisation LEACH, utilise la rotation randomisée des chefs de groupes CHs. Ainsi pour minimiser la consommation d'énergie des nœuds, qui sont proches à la station de base, nous avons utilisé la technique de la communication directe avec la station de base, elle est supposé comme un nœud

d'agrégation, puis qu'elle est dotée de ressources supérieurs(en termes d'énergie et capacité de calcul). Et dans le cas d'absence des chefs de groupes, le nœud capteur communiquera directement avec la station de base, pour assurer une couverture meilleure de la zone d'intérêt.

Les résultats de simulation ont montré que le protocole LEACH-m améliore les performances du réseau en termes de période de stabilité, de consommation énergétique, et de quantité d'information.

Toutefois, cet effort ne peut être considéré que comme un début pour un travail plus profond qui aurait comme objectif l'auto-organisation dans les RCSFs pour une optimisation plus poussée pour augmenter la durée de vie, la durée de stabilité du réseau, et enfin de compte leurs efficacités et leurs rentabilités.

Perspectives :

Afin de continuer dans le même cadre de ce travail, nous proposons de développer notre approche d'auto-organisation pour:

- *Traiter le problème de passage à l'échelle (Scalability) :* La plupart des protocoles d'auto-organisation hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil utilisent des algorithmes de clusterisation à ***un saut***, des chefs de groupes (cluster heads) à la station de base. Ce la devient impossible quand l'étendue du réseau augmente. Pour remédier à ce problème, nous proposons deux solutions à développer :

    - Algorithme d'auto-organisation hiérarchique à plusieurs sauts (multi-sauts) pour les grands réseaux de capteurs.
    - Auto-organisation hiérarchique avec puits multiples de réseaux de capteurs sans fil de grande taille.

- *Assurer un fonctionnement optimal du réseau par minimisation de la consommation des ressources en termes d'énergie* : Pour résoudre ce problème, nous proposons d'ajouter de nouvelles règles (l'énergie résiduelle de nœud capteur), pour l'élection des CH (Plus le nœud possède une énergie importante plus il peut devenir CH).

I - Estimation des distances [GUE 12]:

1. Estimation des distances à partir des liens de communication :

L'estimation de distance peut se faire sur base de différents indicateurs. De manière générale, si c_{ij} est la valeur de l'indicateur entre les nœuds i et j et si la fonction f nous permet de déduire une estimation de la distance entre i et j (que nous notons d_{ij}), nous avons donc :

$$d_{ij} = f(c_{ij})$$

Plusieurs technologies permettent à un capteur de mesurer la distance qui capteur voisin (ToA, TDoA, LQI, RSSI) ou bien de mesurer l'angle qu'il forme avec celui (AoA).

a. Temps d'arrivée (ToA) :

La technologie ToA (Time of Arrival), suppose que les nœuds du réseau sont synchrones. La distance qui sépare deux capteurs se déduit de la vitesse de propagation du signal et de la différence entre les dates d'émission et de réception du message. Cette technologie est celle utilisée par le système GPS (Global Positioning System) [CLE 08]. Lorsque les nœuds ne sont pas synchrones, l'envoi d'un message aller -retour est nécessaire. En fonction de son horloge, de la vitesse de propagation du signal et du temps de traitement du signal reçu, un capteur récepteur obtient la distance qui le sépare du capteur émetteur en calculant la différence entre les dates d'émission et de réception, en y soustrayant le temps de traitement du signal, puis en divisant le résultat par deux on suppose que les nœuds du réseau ont un temps de traitement du signal identique. [CLE 08].

b. Différence des temps d'arrivée (TDoA):

La technologie TDoA (Time Difference of Arrival) [CLE 08] se base sur la différence des dates d'arrivée d'un ou plusieurs signaux et suppose également que la vitesse de propagation des signaux est connue. Cette technologie s'applique dans les cas suivants :
– un émetteur envoie des signaux de natures différentes (par exemple l'ultrason, l'onde radio, ...) à un récepteur.
– un récepteur reçoit des signaux d'une même nature d'au moins trois émetteurs ;
– un émetteur envoie un signal reçu par au moins trois récepteurs (dans ce dernier cas une vue globale des signaux sera connue).

Dans chacun des cas, les récepteurs mettent en corrélation leurs informations et en déduisent les distances qui les séparent des émetteurs. Il s'agit d'une simple résolution d'un système d'équations dont les distances sont les inconnues.

c. *Angle d'arrivée (AoA):*

La technologie AoA (Angle of Arrival) [CLE 08] calcule l'angle formé entre deux capteurs. Chaque capteur est doté d'antennes orientées de sorte à déduire l'angle qu'il forme avec un voisin lorsque ce dernier lui envoie un signal. Cet angle est reporté par rapport à un axe propre au capteur. Toutefois, un capteur peut être équipé d'une boussole et, dans ce cas, l'angle sera reporté sur un des axes nord, sud, est ou ouest.

d. *Indicateur de la qualité du lien (LQI) :*

Selon la norme 802.15.4 (zigbee), le LQI (Link Quality Indicator) est une indication de la puissance et/ou de la qualité d'un paquet reçu. Dans la radio, cette valeur fournit une indication sur le taux d'erreurs à la réception d'un message. Il s'agit de la moyenne des erreurs sur les 8 premiers symboles reçus après le SFD (Start of Frame Delimiter) une séquence de bits qui indique le début d'un message. La valeur est comprise entre 50 et 110. Une valeur de 110 correspondants à une transmission sans erreur et une valeur de 50 à un taux critique d'erreurs (proche de la corruption et du rejet du paquet). L'utilisation de cette mesure dans les couches réseau et application n'a pas encore été spécifiée dans le Standard IEEE-802.15.4.

La mesure du LQI doit être effectuée pour chaque paquet reçu, et le résultat doit être signalé à la couche MAC comme un entier allant d e 0 à 255. Le minimum et le maximum des valeurs du LQI (0 et 255) devraient être associés à la plus basse et la plus haute qualité des signaux détectables par le récepteur. Les valeurs LQI doivent être uniformément réparties entre ces deux limites et dépend vraiment du type de récepteur utilisé, notamment celui du module radio CC2500 où ces deux limites sont en fait 50 et 110.

Les capteurs ne connaissent pas la position géographique exacte des autres nœuds. La détermination du nœud le plus proche et le plus éloigné dépend de l'indicateur de la qualité du lien. Pour chaque paquet reçu cette valeur est retournée par le module radio. Plus la valeur est grande, meilleure est la qualité du lien entre les deux nœuds dont il est question. Par conséquent, dans ces capteurs, si le LQI entre deux nœuds est au-dessus d'un seuil donné, ils peuvent communiquer directement, en tenant compte de l'ensemble de la topologie du réseau.

Un nœud calcule la qualité de ses liens avec ses trois meilleurs voisins et construit ainsi sa table de voisinage en tenant compte également du nombre de sauts (**distance**) vers la Station de Base. Le choix du prochain saut (voisin) dépend de l'estimation du coût du lien afin d'atteindre la Station de Base. [KAC 09]

e. Puissance du signal : RSSI (Received Signal Strength Indicator)

La puissance d'émission et de réception d'un signal peut être également exploitée pour obtenir la distance entre deux capteurs. La technologie RSSI (Received Signal Strength Indicator) considère la perte de puissance d'un signal entre son émission et sa réception. Cette perte varie en fonction de la distance entre les deux capteurs : plus les capteurs sont éloignés (resp. proches), plus la perte est importante (resp. faible). Cette perte sera alors traduite en une distance. La perte de puissance entre l'émetteur et le récepteur est proportionnelle à la distance parcourue. La mesure RSSI propose une estimation de la distance mais pas de son axe directeur. La mesure du RSSI est une valeur arbitraire, elle dépend de la manière dont le constructeur de l'équipement la implémentée.

2. Calcul des distances manquantes pour la dérivation des positions :

En général les distances déduites des liens de communication ne sont pas suffisantes pour la deuxième partie qui consiste à dériver les positions des capteurs. Pour calculer les distances manquantes, il existe plusieurs possibilités:

a. la méthode Sum-dist :

Si 2 nœuds a et b ne peuvent pas communiquer entre eux mais peuvent tous les deux communiquer avec un nœud c intermédiaire, nous pouvons déduire la distance entre a et b par $d_{ab} = d_{ac} + d_{cb}$. Cette méthode ne donne néanmoins pas toujours de bons résultats, surtout dans des réseaux ou la topologie est très irrégulière. Elle a le mérite d'être simple et peu coûteuse. On peut l'appliquer sur un réseau, qui serait représenté par un graphe, en utilisant un algorithme de fermeture transitive de graphe [LAN 03].

b. la méthode Euclidienne:

[NIC 03] a proposé une autre méthode appelée Euclidienne qui est basée sur la géométrie locale des nœuds autour d'une ancre. C'est une méthode géométrique qui utilise les propriétés des angles dans les triangles pour estimer les distances manquantes.

Les ancres commencent par diffuser leurs positions et les capteurs estiment les distances qui les séparent de ces ancres. Cette technique calcule, sous certaines conditions, une distance exacte lorsqu'un capteur connaît deux voisins ayant estimé leurs distances avec une ancre.

II- Les réseaux Ad Hoc :

Le concept des réseaux Ad Hoc essaye d'étendre la notion de la mobilité à toutes les composantes de l'environnement mobile. Ici, contrairement aux réseaux basés sur la communication cellulaire, aucune administration centralisée n'est disponible. Ce sont les hôtes mobiles, eux même, qui forment, d'une manière ad hoc, une infrastructure du réseau. Aucune supposition n'est faite sur la taille du réseau ad hoc, théoriquement, le réseau peut contenir plusieurs milliers d'unités mobiles.

Les réseaux ad hoc sont idéals pour les applications caractérisées par une absence d'une infrastructure préexistante, tel que les applications militaires ou les autres applications de tactique comme les opérations de secours (incendies, tremblements de terre,…) et les missions d'exploration.

1- Définition :

Un réseau ad hoc, appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc Network), est une collection d'unités mobiles munies d'interfaces de communication sans fil, formant un réseau temporaire sans recourir à aucune infrastructure fixe ou administration centralisée [33]. Dans de tels environnements, les unités se comportent comme des hôtes et/ou des routeurs.

Les nœuds des MANETs sont équipés d'émetteurs et de récepteurs sans fil utilisant des antennes qui peuvent être omnidirectionnelles (broadcast), fortement directionnelles (point à point), ou une combinaison de ces deux types. Ils maintiennent d'une manière coopérative la connectivité du réseau, en fonction de leurs positions, la configuration de leurs émetteurs/récepteurs, la puissance de transmission et les interférences entre les canaux de communication. La modélisation de cette connectivité est détaillée dans la section suivante.
Un réseau ad hoc peut être isolé, mais il peut aussi avoir des passerelles ou des interfaces qui le relient à un réseau fixe.

2- Comparaison entre les RCSFs et les réseaux Ad hoc classiques.

Les RCFS sont souvent comparés aux réseaux ad hoc (ou MANET, pour Mobile Ad hoc NETwork) traditionnels car ces deux types de réseaux partagent beaucoup de points communs [YAC 12 :

- ✓ Tous les deux sont des réseaux sans fil, ce qui fait que la portée de communications est limitée par la capacité de rayonnement des antennes utilisées et les puissances mises en jeu. Ainsi, les nœuds dans ces types de réseaux sont souvent des configurations multi-sauts,

ANNEXE

- ✓ Tous les deux sont des réseaux ad hoc, c'est à dire, ils fonctionnent sans avoir besoin d'une infrastructure pour la gestion des échanges. De ce fait, ils ont besoin d'être auto configurables,

- ✓ Ces réseaux travaillent sur une bande de fréquences non propriétaire, ce qui rend leurs communications vulnérables aux problèmes d'interférences,

- ✓ Les entités de ces réseaux sont souvent alimentées par des batteries,

- ✓ Les entités d'un réseau MANET sont souvent utilisées directement par des êtres humains, comme les portables, les PDA, etc. Dans les réseaux de capteurs sans fil les entités interagissent essentiellement avec la nature ou l'environnement ou entre elles,

- ✓ Le nombre de nœuds dans un réseau de capteur peut-être beaucoup plus important que dans les réseaux ad hoc (forte scalabilité),

- ✓ Les capteurs peuvent être densément déployés (forte densité), dans les réseaux de capteurs,

- ✓ Le fait que les nœuds du réseau dans un RCSF sont souvent déployés dans des environnements hostiles (forêts, volcans, etc.) les rend vulnérables et risque de tomber en panne beaucoup plus souvent que les nœuds dans un réseau MANET (tolérance aux panes),

- ✓ La topologie des capteurs change fréquemment du fait des pannes des nœuds ou de leur mobilité (flexibilité),

- ✓ Les échanges de données dans les applications d'un réseau RCSF sont souvent du type collecte de données. Les nœuds doivent envoyer vers un puits des informations sur des phénomènes observés (*modèle de communication many-to-one*) alors que les applications des réseaux MANET sont plus orientées calcul distribué et donc le trafic circule entre tous les nœuds du réseau et dans tous les sens *(modèle de communication any-to-any*),

- ✓ Les réseaux de capteurs utilisent principalement les communications broadcast alors que la plupart des réseaux ad hoc sont basés sur les communications point à point,

- ✓ Les nœuds capteurs sont caractérisés par des ressources plus limitées (ressource d'énergie, puissance de calcul et mémoire). Les nœuds dans un MANET sont plus puissants et possèdent des capacités beaucoup plus importantes,

- ✓ Les RCFS sont qualifiés de réseaux `a basse consommation et `a bas débit *(Low-Power Low-Rate Wireless Personal Area Network, LP-LR-WPAN)*, ceci n'est pas le cas des MANET, même si les nœuds d'un MANET sont souvent alimentés sur batteries, ils sont facilement rechargeables,

- ✓ Les nœuds capteurs ne possèdent aucune identification (ID) globale tel que les adresses IP dans les réseaux ad hoc.

BIBLIOGRAPHIE

[ABB 07]	Ameer-Ahmed Abbasi and Mohamed F. Younis, « A Survey on Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks », Computer Communications, 30(14-15) :2826–2841, 2007.
[ADE 09]	Aderohunmu, F. A., & Deng, J. D, « An Enhanced Stable Election Protocol (SEP) for Clustered Heterogeneous WSN », (No. 2009/07), Discussion Paper Series, 2009.
[AOU 12]	Hania AOUDIA, Youcef TOUATI, Arab ALI-CHERIF et Patrich GREUSSAY, « Approche de routage hiérarchique basée sur un mécanisme de clustering dans les réseaux de capteurs sans fil », Manuscrit auteur, publié dans 9ème édition de la conférence MajecSTIC, université de Lille, 2012.
[ATH 10]	Samir ATHMANI, « Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil »memoire de magister, Université Hadj Lakhder - Batna, 2010.
[BEN 07]	Nacéra BENAOUDA, H. Guyennet, A.Hammad,A.H. Benaouda et M. Mostefai, « Modélisation par les groupes d'un réseau sans fil »,Conférence, Laboratoire d'informatique de Franche comté, Besançon, France,2007.
[BOU 07]	Bouabdellah Kechar, « problématique de la consommation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil », LIUPA, université d'Oran, Octobre 2007.
[BOU 08]	BOUBICHE Djallel Eddine, « Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil », mémoire de magister, Université Hadj Lakhder - Batna, 2008.
[BOU 10]	BOUDJAADAR Amina, « Plateforme Basée Agents Pour l'Aide à la conception et la Simulation des Réseaux de Capteurs Sans Fil », memoire de magister, universite 20 aout 55 de skikda, BOUDJAADAR Amina, 2010.
[CED 08]	Cédric Bastien ; « Développement d'un outil permettant le suivi d'un objet Mobile » ; Rapport de projet de fin d'étude ; ISA-SERTR. 2008.
[CHA 08]	Yacine CHALLAL, « Les réseaux de capteurs sans fil », cours, université Compiègne, France, 2008.
[CHA 88]	Gérard Chalhoub « MaCARI : Une méthode d'accès d´déterministe et ´économe en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil », Thèse de Doctorat université blaise pascal, 1988.

[DOU 06]	Doufène, N et H Hadjammar. «Routage dans les réseaux de capteurs : optimisation du protocole Directed Diffusion.» Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état. Institut National de formation en Informatique, 2006.
[FAI 12]	S. Faisal, N. Javaid, A. Javaid, M. A. Khan, S. H. Bouk, Z. A. Khan, « Z-SEP: Zonal-Stable Election Protocol for Wireless Sensor Networks », COMSATS Institute of Information Technology, Islamabad, Pakistan, 2012.
[GUE 12]	GUEDMANI Mohamed, LA LOCALISATION DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL (WSNs), mémoire de magistère, Université de MEDEA, 2012
[GUI 12]	Badreddine GUIZANI « Algorithme de clusterisation et protocoles de routage dans les réseaux ad hoc », Thèse de Doctorat, université de technologie de belfort- montbéliard (Tunisie), 2012.
[HAM 07]	Hamzi, A. «Plateforme basée agent pour l'aide à la conception et à la simulation des réseaux de capteurs sans fils.» Mémoire pour l'obtention du diplome de magistere en informatique. 2007.
[HEI 00]	Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H, « Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks », In System Sciences, Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on (pp. 10-pp). IEEE, 2000.
[HEI 02]	W. R. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, « An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks » IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 4, pp. 660670, October 2002.
[HEU 09]	Karel Heurtefeux « PROTOCOLES LOCALISÉS POUR RÉSEAUX DE CAPTEURS » Thèse de Doctorat, Ecole doctorale, Informatique et Mathématiques de Lyon, 2009.
[HOL 05]	K. Holger and Andreas Willig. « Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks . Wiley, 2005.
[HUN 10]	Hung Coung, « Optimisation d'accès au médium et stockage de données distribuées dans Les réseaux de capteurs » Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 2010.
[LEH 09]	LEHSAINI Mohamed, « Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les Réseaux », Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté Besançon ,2009.
[MOU 06]	Omar MOUSSAOUI, « Routage hiérarchique basé sur le clustering » Thèse de Doctorat, université de Cergy-Pontoise, 2006.

[NEF 07]	Bilel NEFZI « Qualité de service temps réel dans les Protocoles IEEE 802.15.4 Et ZigBee et leurs améliorations », memoire de magister, Université Henri Poincaré Nancy I, 2007
[OUA 09]	Nabil OUAZENE, «Pour une QoS au niveau de la Couche MAC dans les Réseaux Sans Fil », mémoire de magister, Université Hadj Lakhdar Batna ,2009.
[QIN 06]	Qing, L., Zhu, Q., & Wang, M. « Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks », Computer communications, 29(12), 2230-2237, 2006.
[REH 13]	O. Rehman, N. Javaid, B. Manzoor, A. Hafeez, A. Iqbal, M. Ishfaq, « Energy Consumption Rate based Stable Election Protocol (ECRSEP) for WSNs, » International Workshop on Body Area Sensor Networks (BASNet-2013).
[RIL 00]	George F. Riley «Using the Georgia Tech Network Simulator», Georgia Institute of Technology, 2000.
[SMA 04]	Smaragdakis, G., Matta, I., & Bestavros, A, « SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks ». Boston University Computer Science Department, 2004.
[SOH 07]	Kazem SOHRABY, Daniel MINOLI, Taieb ZNATI, « wireless sensor networks:Technology, Protocols, and Applications », John Wiley & Sons, Inc, 2007.
[TOH 10]	Thomas Watteyne, eZWSN, Rice University, Houston, Texas: Experimenting with Wireless Sensor Networks using the Ez430-RF2500, 2010.
[VAL 07]	Fabrice VALOIS, « AUTO-ORGANISATION DE RESEAUX RADIO MULTI-SAUTS », mémoire pour l'obtention du diplôme d'habilitation `a diriger des recherches, Université Claude Bernard - Lyon 1, 2007.
[VAN 07]	Adrien VAN DEN BOSSCHE, « Proposition d'une nouvelle méthode d'accès déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles » Thèse de Doctorat, université de TOULOUSE, 2007.
[YAC 12]	YACINE YOUNES, « Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs » memoire de magister, université MOULOUD MAMMERI de tizi-ouzou, 2012.
[YAS 07]	Yasser Romdhane, «évaluation des performances des protocoles S-MAC et directed diffusion dans les réseaux de capteurs », rapport de projet de fin d'étude, école supérieure des communications de Tunis, 2007.
[YOU 10]	YOUSEF Yaser « Routage pour la Gestion de l'Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil », Thèse de Doctorat, université de HAUTE ALSACE, 2010.